

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: *Комп'ютерна система контролю якості зберігання
зерна в елеваторі*

Виконав(ла): студент(ка) *IV* курсу, групи *СІс-41*
спеціальності *123 «Комп'ютерна інженерія»*

(шифр і назва спеціальності)

Калиновський В. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Лецишин Ю.З.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Тиш Є.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 25 » квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Калиновському Владиславу Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерна система контролю якості зберігання
зерна в елеваторі

Керівник роботи Лецишин Юрій Зіновійович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » 04 2026 року № 4/9-189

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16.06.2026р.

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технічного завдання

2. Проектна частина

3. Практична частина

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Схема електрична структурна

2. Схема електрична принципова

3. Блок схема алгоритму роботи системи

4. Макет моделі

АНОТАЦІЯ

Калиновський В. В. Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спец. 123 — комп'ютерна інженерія. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2026.

Ключові слова: Arduino, UART, SPI, I²C, теплові поля, алгоритм.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з чотирьох розділів.

У першому розділі виконано аналіз технічного завдання, та укладено вимоги до комп'ютеризованої системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі та аналіз можливих рішень.

В другому розділі описується процес проектування та реалізації проекту, як комп'ютеризованої системи моніторингу теплових полів технічних об'єктів. Приводиться розробка апаратного забезпечення для функціонування системи. Розглядаються бібліотеки та реалізація функцій побудованих на основі них, їх алгоритми.

В третьому розділі проводиться програмна реалізація та тестування комп'ютеризованої системи моніторингу теплових полів технічних об'єктів в реальних умовах експлуатації.

Четвертий розділ описує безпеку життєдіяльності, основи охорони праці.

ABSTRACT

Kalynovs'kyy V.V. Computer System for Grain Storage Quality Control in an Elevator. Bachelor's Graduation Thesis: speciality 123 — computer engineering. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2026.

Keywords: Arduino, UART, SPI, I2C, thermal fields, algorithm.

The bachelor's qualification work consists of four sections.

The first section analyzes the technical task, and concludes the requirements for a computerized system for monitoring the quality of grain storage in an elevator and analyzes possible solutions.

The second section describes the process of designing and implementing the project as a computerized system for monitoring thermal fields of technical objects. The development of hardware for the functioning of the system is presented. Libraries and the implementation of functions built on their basis, their algorithms are considered.

The third section is the software implementation and testing of a computerized system for monitoring thermal fields of technical objects in real operating conditions.

The fourth section describes the safety of life, the basics of labor protection.

ЗМІСТ

СПИСОК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ.....	11
1.1 Основні вимоги до вимірювання температури зерна в сховищі	11
1.2 Основні вимоги до системи	14
1.3 Аналіз можливих рішень поставленого завдання	17
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА.....	19
2.1 Розробка структури системи.....	19
2.2 Обґрунтування вибору апаратного забезпечення проектованої системи	21
2.2.1 Вибір тепловізора Seek Thermal Mosaic Core	211
2.2.2 Вибір USB камери	22
2.2.3 Вибір лазерного далекоміра LIDAR-Lite v3	25
2.2.4 Вибір мікроконтролера Arduino PRO mini для керування системою.....	28
2.3 Опис шин, протоколів, які використовуються в проекті.	32
2.3.1 Застосування I ² C шини для роботи з лідаром.....	32
2.3.2 Управління сервоприводами за допомогою ШІМ сигналів.....	35
2.4 Опис використовуваних бібліотек	38
2.5 Проектування алгоритму роботи комп'ютерної системи	40
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	43
3.1 Підключення і налаштування модулів	43
3.2 Опис основної програми роботи системи.....	44

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Калиновський			Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі Пояснююча записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Лецишин Ю.З.					6	64
Н. Контр.		Тиш Є.В.			ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41			
Затверд.		Осухівська Г.М.						

3.3 Результати тестування системи..... **Помилка! Закладку не визначено.**

РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ..... 56

4.1. Долікарська допомога при отруєннях..... 56

4.2. Загальні вимоги безпеки з охорони праці для користувачів ПК. 58

ВИСНОВКИ..... 61

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 62

Додаток А. Технічне завдання

Додаток Б. Перелік елементів

Додаток В. Код програми

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І
СКОРОЧЕНЬ

I2C — Inter-Integrated Circuit

PWM — Pulse-width modulation

UART — universal asynchronous receiver-transmitter

ПК — персональний комп'ютер

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Зернове господарство є однією з провідних галузей агропромислового комплексу України, а забезпечення належних умов зберігання зерна є важливою складовою ефективного функціонування сільськогосподарських підприємств. Після збирання врожаю зерно може зберігатися в елеваторах протягом тривалого часу, тому особливого значення набуває контроль параметрів середовища, які безпосередньо впливають на його якість. Порушення температурного режиму, підвищення вологості, розвиток мікроорганізмів або шкідників можуть призвести до самозігрівання зернової маси, втрати її товарних властивостей та значних економічних збитків [1-3].

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій для вирішення таких завдань широко використовуються комп'ютерні системи моніторингу та автоматизованого контролю. Вони забезпечують безперервне спостереження за станом зерна, оперативне виявлення відхилень від встановлених норм і своєчасне прийняття рішень щодо усунення небезпечних факторів. Використання автоматизованих систем дозволяє значно підвищити точність вимірювань, зменшити вплив людського фактора та оптимізувати процес управління елеваторним господарством.

Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі являє собою комплекс технічних і програмних засобів, до складу якого входять датчики температури та вологості, засоби збору й передачі інформації, мікроконтролери або промислові контролери, а також програмне забезпечення для обробки, аналізу та візуалізації отриманих даних. Така система дає можливість здійснювати постійний контроль стану зернової маси в різних зонах силосу, прогнозувати можливі ризики погіршення якості продукції та автоматично формувати повідомлення про виникнення аварійних ситуацій.

Актуальність розробки комп'ютерних систем контролю якості зберігання зерна зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання елеваторних комплексів, зниження втрат продукції та забезпечення високої

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

якості зерна протягом усього періоду його зберігання. Впровадження таких систем сприяє автоматизації виробничих процесів, підвищенню надійності контролю технологічних параметрів і забезпеченню економічної доцільності роботи підприємства. Саме тому розробка та дослідження комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі є актуальним і важливим завданням сучасної інженерії та автоматизації технологічних процесів.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Основні вимоги до вимірювання температури зерна в сховищі

Контроль температури зерна в елеваторі є одним із найважливіших заходів забезпечення його якісного та безпечного зберігання. Після збирання врожаю зерно залишається біологічно активним матеріалом, у якому продовжуються процеси дихання, теплообміну та взаємодії з навколишнім середовищем. Під час зберігання в зерновій масі можуть виникати локальні осередки підвищеної температури, які є наслідком життєдіяльності мікроорганізмів, комах-шкідників, підвищеної вологості або інтенсивних біохімічних процесів. Якщо такі явища не виявити своєчасно, вони можуть призвести до самозігрівання зерна, його псування та значних економічних втрат. Саме тому постійний контроль температури є обов'язковою складовою технологічного процесу зберігання зернових культур [1-3].

Температура є одним із найбільш інформативних показників стану зернової маси (див. рис.1.1). Навіть незначне локальне підвищення температури часто свідчить про початок небезпечних процесів усередині зерносховища. На ранніх стадіях самозігрівання температура може перевищувати середню лише на декілька градусів, однак з часом швидкість розвитку процесу суттєво зростає. У результаті виникають сприятливі умови для розвитку плісняви, бактерій та шкідників, що призводить до погіршення якості зерна, зміни його фізичних і хімічних властивостей, зниження схожості насінневого матеріалу та втрати товарної цінності продукції. Регулярний температурний контроль дозволяє виявляти такі процеси на початковому етапі та запобігати їх подальшому розвитку.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Калиновський			Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі Пояснююча записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Лецишин Ю.З.					11	64
Н. Контр.		Тили Є.В.				ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41		
Затверд.		Осухівська Г.М.						

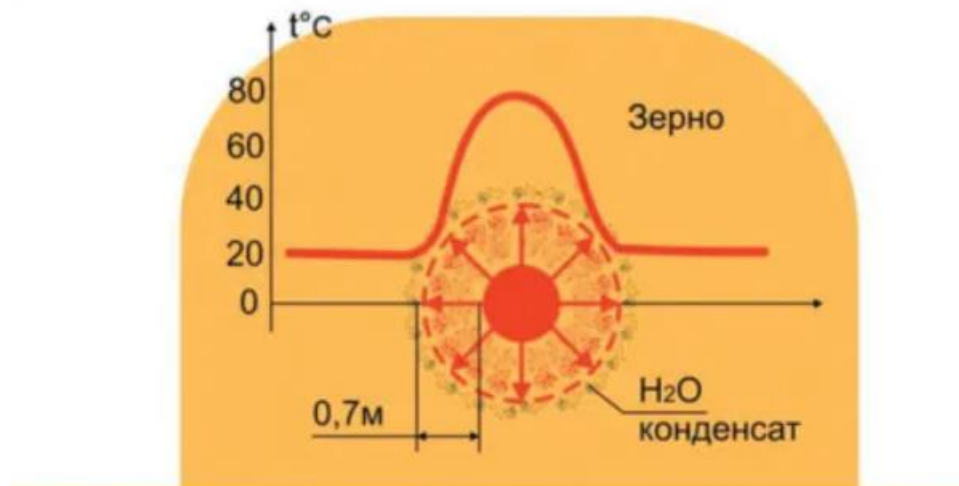


Рисунок 1.1 – Нагрівання зерна внаслідок високої вологості

Однією з основних причин контролю температури є необхідність запобігання самозігріванню зерна. Самозігрівання виникає внаслідок накопичення тепла всередині зернової маси, яке не встигає відводитися в навколишнє середовище. Особливо небезпечними є ділянки з підвищеною вологістю, де активізуються біохімічні процеси та розвиток мікроорганізмів. У таких умовах температура може поступово підвищуватися до критичних значень, що призводить до псування продукції, утворення осередків гниття та втрати значної частини врожаю. Своєчасне виявлення температурних аномалій дає можливість вжити необхідних заходів, таких як аерація, переміщення зерна або його додаткове сушіння.

Контроль температури також необхідний для забезпечення економічної ефективності роботи елеватора (див. рис.1.2) [1-5]. Втрата якості зерна безпосередньо впливає на його ринкову вартість та конкурентоспроможність. Навіть часткове псування зернової маси може призвести до значних фінансових збитків для підприємства. Завдяки постійному моніторингу температури можна своєчасно приймати рішення щодо оптимізації режимів вентиляції та зберігання, мінімізувати витрати на переробку продукції та зменшити ризик втрати великих партій зерна.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

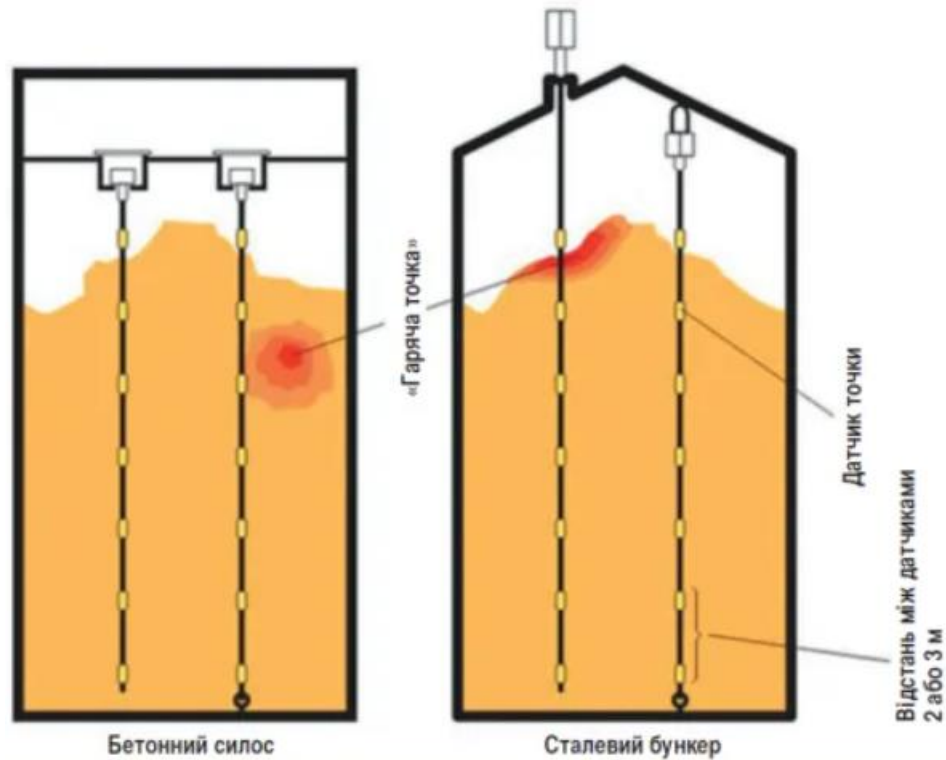


Рисунок 1.2 – Розміщення датчиків температури в бункері

Ще одним важливим аспектом є забезпечення пожежної безпеки елеваторного комплексу. У випадках тривалого неконтрольованого самозігрівання температура в окремих зонах зернової маси може досягати значень, за яких виникає ризик займання органічних матеріалів або утворення умов для вибуху пилоповітряних сумішей. Хоча такі ситуації виникають відносно рідко, їх наслідки можуть бути надзвичайно небезпечними як для матеріальних цінностей, так і для персоналу підприємства. Тому системи температурного контролю є важливим елементом загальної системи безпеки елеватора.

Крім того, інформація про температурний стан зерна використовується для управління технологічними процесами зберігання. На основі даних моніторингу можуть автоматично вмикатися системи вентиляції, охолодження або перемішування зернової маси (див. рис.1.3) [1-6]. Це дозволяє підтримувати оптимальні умови зберігання та забезпечувати рівномірний розподіл температури по всьому об'єму сховища. Сучасні комп'ютерні системи

контролю дають можливість не лише реєструвати поточні значення температури, а й аналізувати їх зміни в часі, прогнозувати розвиток небезпечних процесів та формувати попередження для операторів.

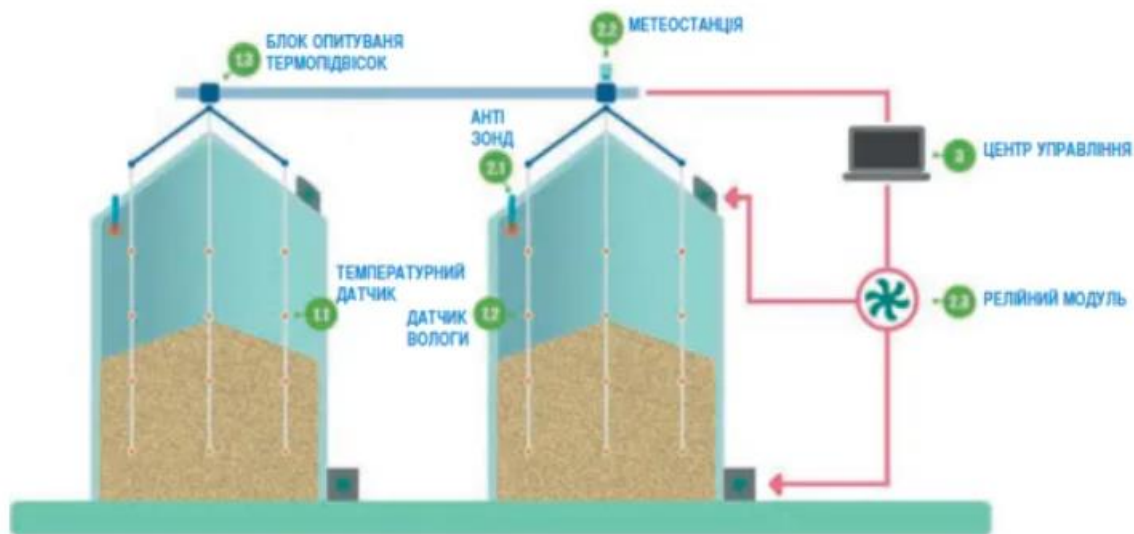


Рисунок 1.3 – Система висушування зерна в елеваторі

Таким чином, контроль температури зерна в елеваторі є необхідною умовою збереження його якості, запобігання самозігріванню, розвитку мікроорганізмів і шкідників, забезпечення пожежної безпеки та підвищення економічної ефективності роботи підприємства. Своєчасне отримання достовірної інформації про температурний стан зернової маси дозволяє оперативно реагувати на небезпечні зміни, мінімізувати втрати продукції та забезпечувати надійне зберігання зерна протягом усього періоду перебування в елеваторі.

1.2 Основні вимоги до системи

Основною метою вимірювання температури зерна в сховищі за допомогою тепловізора є своєчасне виявлення зон самозігрівання, локальних осередків підвищеної температури та інших аномалій, які можуть свідчити про погіршення умов зберігання зернової маси. Для забезпечення достовірності та

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

ефективності контролю система тепловізійного моніторингу повинна відповідати ряду технічних і експлуатаційних вимог. Насамперед тепловізор повинен мати достатню температурну чутливість, що дозволяє реєструвати незначні зміни температури поверхні зерна. Оскільки початкові стадії самозгрівання можуть супроводжуватися підвищенням температури лише на декілька десятих градуса, бажано використовувати тепловізійні камери з температурною роздільною здатністю не гірше 0,05 °С. Висока чутливість дає змогу виявляти потенційно небезпечні ділянки ще до того, як процес набуде критичного характеру.

Важливою вимогою є також достатня просторова роздільна здатність тепловізора. Вона визначає мінімальний розмір об'єкта або температурної аномалії, яку система здатна виявити на заданій відстані. При контролі великих зерносховищ або силосів тепловізійна камера повинна забезпечувати огляд значної площі, одночасно зберігаючи можливість виявлення локальних зон перегріву. Для цього необхідно правильно обирати роздільну здатність матриці, фокусну відстань об'єктива та висоту встановлення камери. Чим менший розмір ділянки поверхні, що відповідає одному пікселю теплового зображення, тим точніше можна локалізувати осередок підвищеної температури.

Особливу увагу необхідно приділяти точності вимірювання температури. Похибки можуть виникати через вплив зовнішніх факторів, таких як зміна температури навколишнього середовища, наявність пилу, вологи або неоднорідність поверхні зерна. Тому система повинна передбачати можливість корекції коефіцієнта випромінювання матеріалу, а також періодичне калібрування вимірювального обладнання. Для зерна коефіцієнт випромінювання зазвичай знаходиться в межах 0,90–0,95, що необхідно враховувати під час налаштування тепловізора для отримання достовірних результатів.

Ще однією важливою вимогою є забезпечення повного покриття контрольованої поверхні. У великих сховищах одна камера може не

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечувати необхідної зони огляду, тому доцільним є використання поворотних механізмів або декількох тепловізійних камер. Застосування автоматичного сканування дозволяє послідовно контролювати різні ділянки зернової поверхні та формувати єдину теплову карту сховища. Такий підхід підвищує ефективність моніторингу та зменшує ймовірність пропуску локальних зон перегріву.

Система тепловізійного контролю повинна працювати в автоматичному режимі та забезпечувати безперервний збір і збереження інформації. Дані вимірювань мають передаватися до комп'ютерної системи для подальшої обробки, аналізу та архівування. Програмне забезпечення повинно підтримувати візуалізацію теплових карт, відображення поточних температурних значень, побудову графіків зміни температури в часі та автоматичне формування повідомлень про перевищення встановлених порогових значень. Це дає можливість оперативно реагувати на небезпечні зміни та своєчасно вживати заходів щодо запобігання псуванню зерна.

Крім технічних характеристик обладнання, важливе значення має надійність функціонування системи в умовах елеватора. Тепловізійна камера повинна бути захищена від пилу, підвищеної вологості, механічних впливів та перепадів температури. Для забезпечення стабільної роботи рекомендується використовувати обладнання з відповідним ступенем захисту корпусу та можливістю дистанційного контролю його стану. Також бажано передбачити резервне живлення та механізми самодіагностики системи.

Таким чином, ефективне вимірювання температури зерна за допомогою тепловізора вимагає поєднання високої температурної чутливості, достатньої просторової роздільної здатності, точності вимірювань, повного покриття контрольованої площі та надійної автоматизованої обробки даних. Виконання цих вимог дозволяє забезпечити раннє виявлення небезпечних процесів у зерновій масі, знизити втрати продукції та підвищити ефективність роботи зерносховищ і елеваторних комплексів.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Аналіз можливих рішень поставленого завдання

На сьогодні існують інфрачервоні сенсори та тепловізійні матриці, характеристики яких перевищують можливості MLX90614 за показником температурної чутливості. Одними з найбільш поширених є тепловізійні матриці серії MLX90640 та MLX90641. На відміну від MLX90614, який є однопиксельним термопільним сенсором, ці пристрої містять масив інфрачервоних датчиків і формують повноцінне теплове зображення об'єкта. Температурна чутливість таких матриць становить близько 40–50 мК, що дозволяє виявляти дуже слабкі температурні аномалії та локалізувати їх положення на поверхні контрольованого об'єкта. Наявність теплового зображення є додатковою перевагою, оскільки дає змогу не лише визначити факт підвищення температури, а й оцінити розміри та координати потенційно небезпечної ділянки.

Для задач підвищеної точності також можуть використовуватися професійні тепловізійні модулі на основі мікроболометричних матриць, такі як FLIR Lepton, Seek Mosaic Core, FLIR Boson та інші. Температурна чутливість подібних пристроїв зазвичай становить від 30 до 50 мК, а в окремих моделях може бути ще нижчою. Такі тепловізори здатні виявляти незначні температурні перепади навіть на значних відстанях, що робить їх придатними для контролю великих зерносклади та елеваторів. Крім високої чутливості, вони характеризуються значно вищою просторовою роздільною здатністю, що дозволяє контролювати великі площі та одночасно виявляти локальні осередки нагрівання.

Для вертикального огляду з висоти 30 м в бункері, вважаючи камеру спрямованою строго вниз. Для порівняння виберемо однакового приблизний HFOV $\approx 24^\circ$: Seek Mosaic 9.1 мм і IMX335 з 12 мм об'єктивом.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для висоти 30 м, камера вниз, з кутом близько 24° HFOV параметри кута огляду зведено в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри огляду камер

Камера	Кут огляду	Покриття на землі з 30 м	Розмір 1 пікселя
Seek Mosaic 320×240, 9.1 мм	24° × 18°	12.75 × 9.50 м	≈4.0 см/піксель
IMX335 5MP + 12 мм	≈24.4° × 18.4°	12.97 × 9.72 м	≈5.0 мм/піксель

Дані для Seek: 320×240, 9.1 мм, HFOV 24°, VFOV 18°.
Для IMX335: сенсор Type 1/2.8, 2592×1944, піксель 2.0 μm.

Для площі 20×20 м на висоті 30 м:

- одним кадром не закриває жодна з цих камер;
- потрібно мінімум 2 кадри по ширині × 3 кадри по висоті = 6 позицій;
- з перекриттям 20% теж виходить приблизно 6 позицій.

Загалом IMX335 з 12 мм добре збігається з Seek Mosaic 9.1 мм по куту огляду. Теплова камера дає ≈4 см/піксель, видима IMX335 — ≈5 мм/піксель

РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка структури системи

Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі повинна складатись із наступних модулів і компонентів та виконувати наступні задачі:

1) Система повинна вимірювати температуру на відстані що визначається відстанню до зерна, яка в процесі технологічного функціонування зерносховища;

2) Система повинна обмінюватись даними з ПК та керуватись з нього , зокрема отримувати параметри сканування і кроку сканування;

3) Система повинна автоматично підтримувати напрям і керування кутом і напрямком сканування поверхні зерна;

4) Система повинна інформувати оператора про зміни теплового поля що відображає стан зерна в сховищі;

За цими вимогами та критеріями було розроблено структурну схему тепловізійної системи сканування рис. 2.1.

Структурна схема комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна враховує вимоги технічного завдання та передбачає використання сучасних модулів і компонентів. Також обмін даними в системі контролю якості зберігання зерна буде відбуватись за допомогою цифрових протоколів I2C для лідара та USB для камер та керування мікроконтролером з ПК.

Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі складається з тепловізійної камери — Termo Cam, лазерного вимірювача відстані — LIDAR та USB Cam, які разом утворюють скануючу систему, що може сканувати поверхню зерна на різних відстанях і з різним кроком.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Калиновський			Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі Пояснююча записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Лецишин Ю.З.					19	64
Н. Контр.		Тили С.В.				ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41		
Затверд.		Осухівська Г.М.						

До складу системи входять два DC/DC стабілізатори живлення +12В, +5В, та +3,3В, які забезпечують постійним струмом елементи системи. Напруга +12В подається від основного джерела живлення, або запасного — це може бути акумулятор або резервна лінія живлення.

2.2 Обґрунтування вибору апаратного забезпечення проекрованої системи

2.2.1 Вибір тепловізора Seek Thermal Mosaic Core

Для реалізації комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі як основний засіб дистанційного вимірювання температури доцільно використовувати тепловізійний модуль Seek Thermal Mosaic Core 320×240 (див. рис.2.2) [3-8]. Вибір даного тепловізора обумовлений поєднанням високої температурної чутливості, достатньої просторової роздільної здатності, компактних габаритів, можливості інтеграції з комп'ютерними системами керування та порівняно невисокої вартості порівняно з професійними тепловізійними камерами промислового класу.

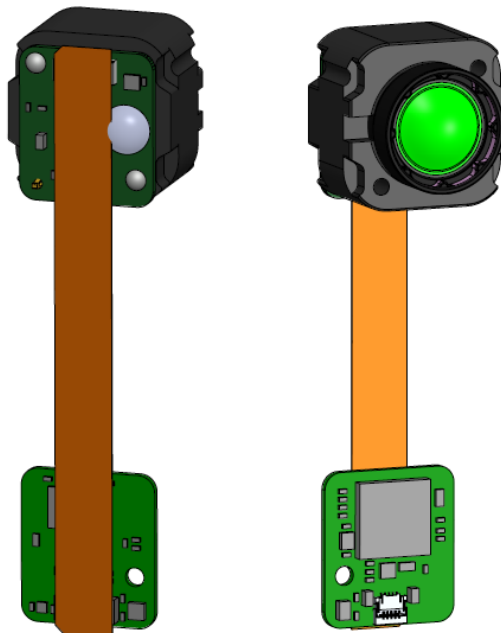


Рисунок 2.2 – Тепловізор Seek Thermal Mosaic Core

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Тепловізійний модуль Seek Thermal Mosaic Core побудований на основі неохолоджуваної мікроболометричної матриці з роздільною здатністю 320×240 пікселів, що забезпечує формування теплового зображення з 76800 незалежних температурних точок. Така роздільна здатність є достатньою для контролю великих площ зернової поверхні та локалізації невеликих осередків підвищеної температури. Для запропонованої системи доцільно використовувати модифікацію з об'єктивом 9,1 мм, яка забезпечує горизонтальний кут огляду 24° та вертикальний кут огляду 18°. При встановленні камери на висоті близько 30 метрів над поверхнею зерна один кадр охоплює приблизно 13×10 метрів контрольованої площі, що дозволяє реалізувати автоматичне сканування всього зерносховища за допомогою поворотного механізму. Частота формування кадрів може досягати 27 Гц, що є достатнім для систем моніторингу температури зерна, де зміни температури відбуваються відносно повільно. алагодження системи. про стан зернової маси. формах та в автоматизованих системах сканування.

2.2.2 Вибір USB камери

Для реалізації комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі доцільним є використання цифрової відеокамери на основі світлочутливої CMOS-матриці Sony IMX335 з об'єктивом фокусною відстанню 12 мм. Дана камера призначена для отримання високодеталізованих зображень поверхні зернової маси та використовується як доповнення до тепловізійної системи моніторингу [3-8]. Основною перевагою камери IMX335 є висока роздільна здатність, що дозволяє виконувати візуальний контроль стану поверхні зерна, виявляти сторонні предмети, локальні зміни кольору, накопичення пилу, появу плісняви, сліди пошкодження конструкцій сховища та інші ознаки, які неможливо визначити лише за допомогою тепловізійного контролю. Використання одночасно тепловізійної та оптичної камери підвищує

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

достовірність моніторингу та забезпечує комплексний контроль технологічного процесу зберігання зерна.

Сенсор Sony IMX335 (див. рис.2.3) належить до сучасних високочутливих CMOS-матриць формату 1/2,8 дюйма та забезпечує максимальну роздільну здатність 2592×1944 пікселів, що відповідає приблизно 5 мегапікселям. Розмір пікселя становить 2 мкм, що забезпечує високу деталізацію отриманого зображення та хорошу якість роботи в умовах недостатнього освітлення. Камера підтримує формування відеопотоку з роздільною здатністю до 5 Мп при частоті до 30 кадрів за секунду, що є більш ніж достатнім для систем спостереження та контролю зерносховищ. Висока роздільна здатність дозволяє виявляти дрібні об'єкти та локальні дефекти поверхні зерна навіть при значній відстані між камерою та об'єктом спостереження.



Рисунок 2.3 – USB камера Sony IMX335

Для запропонованої системи використовується об'єктив з фокусною відстанню 12 мм. При встановленні на матрицю формату 1/2,8 дюйма такий об'єктив забезпечує горизонтальний кут огляду близько 24–25° та вертикальний кут огляду близько 18°. Ці параметри практично відповідають характеристикам обраного тепловізора Seek Thermal Mosaic Core 320×240 з об'єктивом 9,1 мм, що значно спрощує суміщення теплових і візуальних зображень. При

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

встановленні камери на висоті приблизно 30 метрів над поверхнею зерна зона огляду становить близько 13×10 метрів. Завдяки високій роздільній здатності один піксель відповідає ділянці поверхні розміром близько 5 мм, що дозволяє отримувати значно детальнішу інформацію порівняно з тепловізійною камерою та використовувати алгоритми комп'ютерного зору для автоматичного аналізу стану зернової маси.

Важливою перевагою камер на базі IMX335 є підтримка сучасних цифрових інтерфейсів передачі даних. Безпосередньо сенсор використовує інтерфейс MIPI CSI-2 для передачі відеоданих до процесора обробки зображення. У складі готових USB-камер на базі IMX335 застосовується спеціальний контролер відеозахоплення, який перетворює відеопотік у стандартний інтерфейс USB 2.0 або USB 3.0 з підтримкою протоколу UVC (USB Video Class). Завдяки цьому камера розпізнається операційною системою як стандартний відеопристрій і не потребує встановлення спеціалізованих драйверів. Передача відеоданих здійснюється через стандартні протоколи USB, що забезпечує високу швидкість обміну інформацією та просту інтеграцію з комп'ютерною системою моніторингу.

У разі використання мережевої версії камери передача даних може здійснюватися через інтерфейс Ethernet із підтримкою протоколів TCP/IP, RTSP, RTP та ONVIF. Протокол RTSP використовується для організації потокової передачі відео в режимі реального часу, RTP забезпечує транспортування мультимедійних даних мережею, а ONVIF гарантує сумісність обладнання різних виробників у межах єдиної системи відеоспостереження. Це дозволяє інтегрувати камеру в централізовану систему керування елеватором та здійснювати віддалений доступ до відеопотоку через локальну мережу або мережу Інтернет.

Для автоматизованого аналізу стану зерна камера може використовуватися спільно з алгоритмами комп'ютерного зору та машинного навчання. Отримані зображення можуть оброблятися програмними засобами

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

OpenCV або іншими системами аналізу відеоданих для виявлення неоднорідностей поверхні, зон підвищеного забруднення, утворення конденсату, пошкодження конструкцій або інших відхилень від нормального стану. Синхронізація даних від тепловізійної та оптичної камери дозволяє зіставляти температурні аномалії з реальним зображенням поверхні зерна та більш точно визначати причини їх виникнення.

Таким чином, використання камери Sony IMX335 з об'єктивом 12 мм є технічно обґрунтованим рішенням для побудови комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі. Камера забезпечує високу просторову роздільну здатність, достатній кут огляду для роботи спільно з тепловізійною системою, підтримку сучасних протоколів передачі даних та можливість інтеграції з алгоритмами автоматизованого аналізу зображень. Поєднання тепловізійного та оптичного контролю дозволяє значно підвищити ефективність моніторингу стану зернової маси, своєчасно виявляти небезпечні процеси та забезпечувати збереження якості продукції під час тривалого зберігання.

2.2.3 Вибір лазерного далекоміра LIDAR-Lite v3

Для реалізації комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі доцільним є використання лазерного далекоміра LIDAR-Lite v3 як допоміжного засобу визначення геометричних параметрів зернової поверхні та контролю положення вимірювальної системи. Використання далекоміра дозволяє автоматично визначати відстань від вимірювального модуля до поверхні зерна, формувати карту рельєфу насипу, контролювати рівень заповнення сховища та забезпечувати коректне масштабування тепловізійних і візуальних зображень. Отримана інформація може використовуватися для підвищення точності локалізації температурних аномалій, виявлених тепловізійною системою, а також для оцінювання об'єму зернової маси та контролю технологічних процесів завантаження й вивантаження елеватора.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лазерний далекомір LIDAR-Lite v3 є компактним оптоелектронним пристроєм, який працює за принципом вимірювання часу проходження лазерного імпульсу до об'єкта та назад. Пристрій випромінює лазерне випромінювання в ближньому інфрачервоному діапазоні та на основі аналізу відбитого сигналу визначає відстань до поверхні об'єкта. Основною перевагою такого методу є висока точність вимірювання та незалежність результатів від кольору поверхні або умов освітлення. Для задач контролю зерна це є особливо важливим, оскільки система може працювати як удень, так і вночі без погіршення характеристик вимірювання.

Технічні характеристики LIDAR-Lite v3 (див. рис.2.4) забезпечують його ефективно використання в автоматизованих системах моніторингу. Робочий діапазон вимірювання становить до 40 метрів для поверхонь з високою відбивною здатністю та близько 20–30 метрів для об'єктів із низьким коефіцієнтом відбиття. Типова похибка вимірювання не перевищує $\pm 2,5$ см, що є достатнім для побудови карти поверхні зернового насипу та визначення рівня заповнення силосу. Роздільна здатність вимірювання становить 1 см, а частота отримання даних може досягати понад 500 вимірювань за секунду залежно від режиму роботи. Робоча напруга живлення знаходиться в межах 4,75–5 В, а середнє споживання струму становить близько 105–130 мА, що дозволяє інтегрувати пристрій у системи з автономним або резервним живленням.

Важливою перевагою LIDAR-Lite v3 є підтримка двох поширених інтерфейсів передачі даних — I²C та PWM. Основним інтерфейсом обміну інформацією є двопровідна послідовна шина I²C (Inter-Integrated Circuit), яка широко використовується в сучасних мікроконтролерних та вбудованих системах. Передача даних здійснюється через лінії SDA та SCL, що дозволяє легко підключати далекомір до мікроконтролерів сімейств STM32, AVR, ESP32, Arduino або одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi. Максимальна швидкість передачі даних через інтерфейс I²C становить до 400 кбіт/с у режимі Fast Mode. Через даний інтерфейс можуть передаватися команди запуску

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювання, дані про поточну відстань, інформація про рівень сигналу та параметри налаштування пристрою.

Додатково пристрій підтримує вихідний інтерфейс PWM (Pulse Width Modulation), у якому інформація про відстань кодується тривалістю імпульсу. Такий режим може використовуватися в простих системах керування, де відсутня необхідність у реалізації цифрового протоколу I²C. Використання двох незалежних способів передачі даних забезпечує високу гнучкість інтеграції далекоміра в різні апаратні платформи та дозволяє вибрати найбільш зручний спосіб підключення залежно від архітектури системи.

У запропонованій системі контролю якості зберігання зерна далекомір може працювати спільно з тепловізором Seek Thermal Mosaic Core та камерою IMX335. Під час роботи поворотного механізму LIDAR-Lite v3 визначає точну відстань до поверхні зерна в кожній точці сканування. Отримані дані використовуються для формування тривимірної карти поверхні зернової маси та автоматичного коригування координат теплових аномалій, виявлених тепловізійною камерою. Це дозволяє значно підвищити точність локалізації зон самогрівання та забезпечує можливість визначення їх реального просторового положення в межах сховища.



Рисунок 2.4 – Лазерний далекомір LIDAR-Lite v3

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатковою перевагою використання LIDAR-Lite v3 є можливість контролю рівня заповнення силосу. У процесі експлуатації елеватора висота зернового насипу постійно змінюється внаслідок завантаження та вивантаження продукції. Безперервне вимірювання відстані до поверхні зерна дозволяє автоматично оцінювати об'єм запасів, контролювати технологічні процеси та вести облік продукції без необхідності використання додаткових датчиків рівня. Завдяки високій швидкості вимірювань система може оперативно реагувати на зміни та забезпечувати актуальність інформації в режимі реального часу.

Таким чином, використання лазерного далекоміра LIDAR-Lite v3 у складі комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна є технічно обгрунтованим рішенням. Пристрій забезпечує високу точність вимірювання відстані, підтримує сучасні протоколи обміну даними I²C та PWM, характеризується невеликими габаритами, низьким енергоспоживанням і простотою інтеграції з мікроконтролерами та комп'ютерними системами. Поєднання інформації від тепловізора, відеокамери та лазерного далекоміра дозволяє створити багатофункціональну систему моніторингу, здатну одночасно контролювати температуру, геометричні параметри поверхні зерна та рівень заповнення сховища, що підвищує ефективність зберігання зернової продукції та зменшує ризик її псування.

2.2.4 Вибір мікроконтролера Arduino PRO mini для керування системою

Для реалізації комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі як центральний вузол збору та первинної обробки даних доцільно використовувати мікроконтролерну платформу Arduino Pro Mini [3-8]. Вибір даного мікроконтролера обумовлений його компактними розмірами, низьким енергоспоживанням, достатньою обчислювальною потужністю для виконання задач збору та передачі даних, а також широкими можливостями інтеграції з різноманітними датчиками та периферійними пристроями. У запропонованій

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системі Arduino Pro Mini виконує функції координації роботи вимірювальних модулів, зчитування інформації від лазерного далекоміра, керування поворотним механізмом сканування, передачі службових даних до центрального комп'ютера та синхронізації роботи окремих компонентів системи моніторингу.

Основою плати Arduino Pro Mini (див. рис.2.5) є 8-бітний мікроконтролер ATmega328P архітектури AVR. Контролер працює на тактовій частоті 16 МГц у версії з живленням 5 В або 8 МГц у версії з живленням 3,3 В. Для реалізації системи контролю зерносховища доцільно використовувати модифікацію з напругою живлення 5 В та частотою 16 МГц, оскільки вона забезпечує максимальну продуктивність та повну сумісність із більшістю периферійних модулів. Мікроконтролер містить 32 КБ флеш-пам'яті для зберігання програми, 2 КБ оперативної пам'яті SRAM для обробки даних та 1 КБ енергонезалежної пам'яті EEPROM для збереження налаштувань і параметрів конфігурації. Такого обсягу пам'яті достатньо для реалізації алгоритмів керування датчиками, формування пакетів даних та організації зв'язку з верхнім рівнем системи.

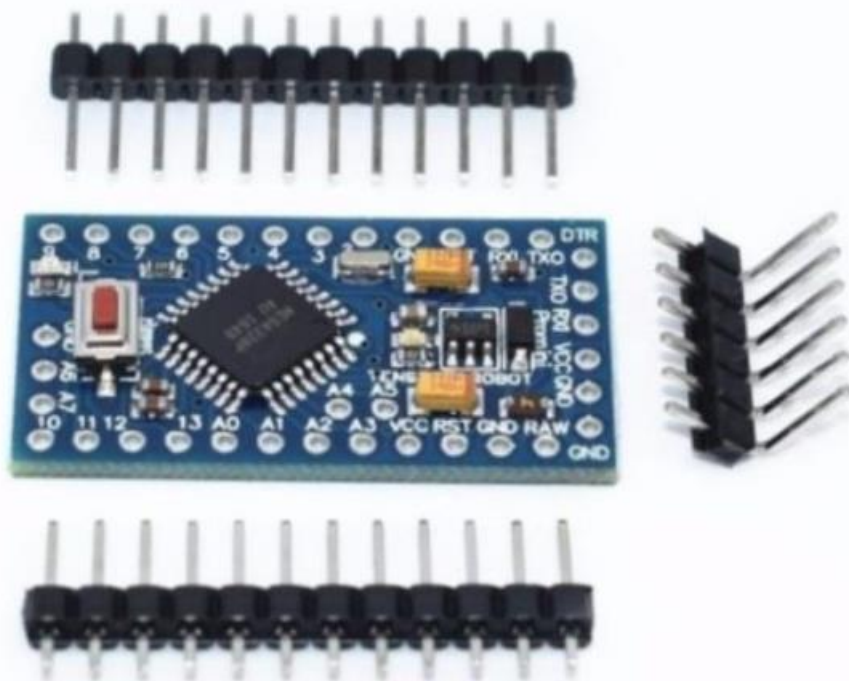


Рисунок 2.5 – Мікроконтролер Arduino PRO mini

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливою перевагою Arduino Pro Mini є наявність широкого набору апаратних інтерфейсів обміну даними. Для взаємодії з лазерним далекоміром LIDAR-Lite v3 використовується інтерфейс I²C (Inter-Integrated Circuit), який реалізований апаратним модулем TWI (Two-Wire Interface) мікроконтролера. Інтерфейс I²C забезпечує двосторонній обмін даними через дві сигнальні лінії SDA та SCL і підтримує швидкість передачі до 400 кбіт/с у режимі Fast Mode. Завдяки цьому мікроконтролер може швидко отримувати дані про відстань, передавати команди запуску вимірювань та змінювати параметри роботи далекоміра. Використання I²C дозволяє підключати до однієї шини декілька пристроїв, що спрощує подальше розширення системи.

Для зв'язку з персональним комп'ютером або одноплатним комп'ютером верхнього рівня використовується інтерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Передача даних здійснюється через послідовний асинхронний протокол зі стандартними швидкостями від 9600 до 115200 біт/с. Через UART мікроконтролер може передавати інформацію про результати вимірювань, координати положення поворотного механізму, сигнали тривоги та службові повідомлення. При необхідності UART може бути підключений до зовнішніх модулів USB-UART, RS-232 або RS-485 для інтеграції в промислові мережі автоматизації.

Додатково мікроконтролер підтримує інтерфейс SPI (Serial Peripheral Interface), який забезпечує високошвидкісний обмін даними між контролером та периферійними пристроями. Максимальна швидкість передачі через SPI може досягати 8 Мбіт/с. Даний інтерфейс може використовуватися для підключення модулів бездротового зв'язку, карт пам'яті, дисплеїв або інших пристроїв, які можуть бути додані до системи в процесі модернізації. Наявність трьох незалежних апаратних інтерфейсів значно підвищує гнучкість системи та забезпечує можливість одночасної роботи з декількома каналами передачі інформації.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для керування поворотним механізмом тепловізійної та відеокамери Arduino Pro Mini використовує цифрові входи-виходи та апаратні канали широтно-імпульсної модуляції PWM (Pulse Width Modulation). На платі доступно 14 цифрових ліній введення-виведення, з яких 6 підтримують формування PWM-сигналів із роздільною здатністю 8 біт. Ці сигнали можуть використовуватися для керування сервоприводами або драйверами крокових двигунів, що забезпечують автоматичне сканування поверхні зернової маси. Крім того, наявність 8 аналогових входів із 10-бітним аналого-цифровим перетворювачем дозволяє підключати додаткові датчики температури, вологості, напруги живлення або інші вимірювальні пристрої.

Важливим фактором при виборі Arduino Pro Mini є його компактність. Розміри плати становлять приблизно 33×18 мм, що дозволяє легко інтегрувати її в корпус вимірювального модуля або блоку керування без значного збільшення габаритів системи. Низьке енергоспоживання забезпечує можливість використання резервних джерел живлення та підвищує загальну надійність роботи комплексу. Завдяки відкритій архітектурі платформа підтримується великою кількістю програмних бібліотек для роботи з інтерфейсами I²C, UART, SPI, сервоприводами, датчиками та мережевими модулями, що значно спрощує процес розробки програмного забезпечення.

У запропонованій системі Arduino Pro Mini не виконує обробку відеопотоків від тепловізора Seek Thermal Mosaic Core та камери IMX335, оскільки ці задачі потребують значно більшої обчислювальної потужності та реалізуються на персональному комп'ютері або одноплатному комп'ютері верхнього рівня. Основною функцією мікроконтролера є збір даних від допоміжних датчиків, керування механізмами позиціонування, синхронізація вимірювань та передача службової інформації до центральної системи обробки даних. Такий розподіл функцій дозволяє ефективно використовувати ресурси обладнання та підвищує надійність роботи всієї системи моніторингу.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, використання Arduino Pro Mini у складі комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна є технічно та економічно обґрунтованим рішенням. Мікроконтролер забезпечує підтримку поширених протоколів обміну даними I²C, UART та SPI, має достатню продуктивність для реалізації задач керування та збору інформації, характеризується компактними розмірами, низьким енергоспоживанням і простотою програмування. Це дозволяє створити надійний вузол керування, який забезпечуватиме ефективну взаємодію між тепловізійною системою, лазерним далекоміром, механізмом сканування та центральним комп'ютером моніторингу елеватора.

2.3 Опис шин, протоколів, які використовуються в проекті.

2.3.1 Застосування I²C шини для роботи з лідаром

Шина I²C (Inter-Integrated Circuit) є одним із найпоширеніших послідовних інтерфейсів обміну даними, який широко використовується в мікроконтролерних, вимірювальних та автоматизованих системах для організації взаємодії між різними електронними пристроями. Даний протокол був розроблений компанією Philips Semiconductor (нині NXP Semiconductors) з метою спрощення підключення великої кількості периферійних модулів до одного керуючого пристрою. Основною особливістю I²C є використання лише двох сигнальних ліній для передачі даних між усіма пристроями (див. рис.2.6), підключеними до спільної шини [3-8]. Перша лінія SDA (Serial Data) призначена для передачі даних, а друга лінія SCL (Serial Clock) використовується для синхронізації обміну інформацією між пристроями. Завдяки такому підходу значно спрощується структура електронної системи, зменшується кількість необхідних провідників та скорочуються витрати на реалізацію апаратної частини.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

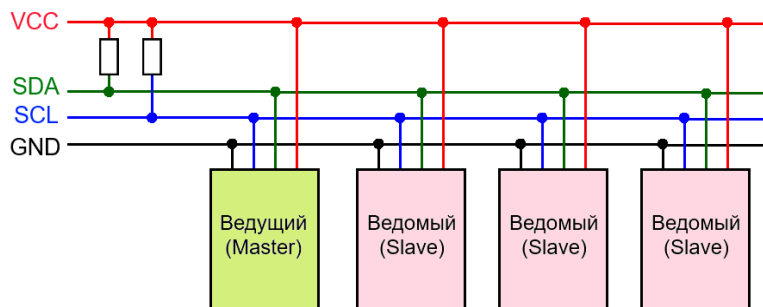


Рисунок 2.6 – Схема побудови шини I2C

Однією з головних особливостей I²C є багатовузлова архітектура, яка дозволяє підключати до однієї шини велику кількість пристроїв. У системі завжди присутній ведучий пристрій (Master), який ініціює передачу даних та керує процесом обміну, а також один або декілька підлеглих пристроїв (Slave), які відповідають на запити ведучого. Кожен підлеглий пристрій має унікальну адресу, за допомогою якої ведучий може звертатися саме до нього. Найчастіше використовуються 7-бітні адреси, що теоретично дозволяє адресувати до 128 пристроїв на одній шині.

Передача даних у шині I²C здійснюється послідовно побітово (див. рис.2.7-2.8). Кожен цикл обміну починається із формування сигналу START, після чого ведучий пристрій передає адресу необхідного підлеглому пристрою та ознаку операції читання або запису. Після успішного прийому адреси підлеглий пристрій надсилає сигнал підтвердження ACK (Acknowledge), після чого починається безпосередня передача інформації. Завершення обміну відбувається шляхом формування сигналу STOP. Така організація протоколу забезпечує високу надійність передачі даних.

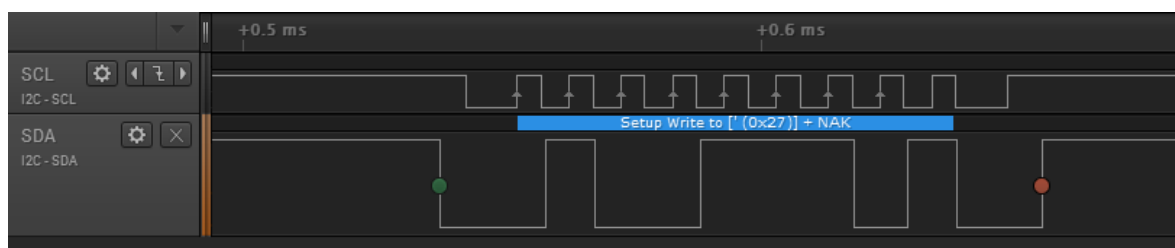


Рисунок 2.7 – Спроба головного пристрою встановити з'єднання з веденим по I2C

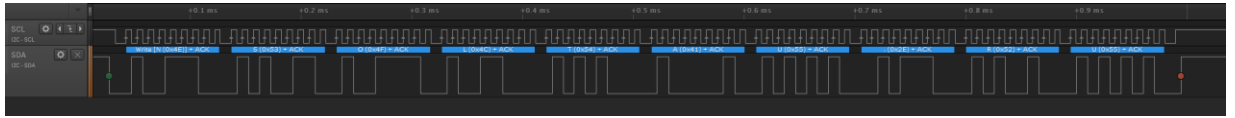


Рисунок 2.8 – Часова діаграма обміну по протоколу I2C

Важливою перевагою I²C є підтримка декількох режимів швидкості передачі даних. У стандартному режимі Standard Mode швидкість становить до 100 кбіт/с. У режимі Fast Mode швидкість може досягати 400 кбіт/с, що є найбільш поширеним варіантом для сучасних мікроконтролерних систем. Також існують режими Fast Mode Plus із швидкістю до 1 Мбіт/с, High-Speed Mode зі швидкістю до 3,4 Мбіт/с та Ultra Fast Mode до 5 Мбіт/с. Наявність декількох швидкісних режимів дозволяє адаптувати систему до конкретних вимог щодо швидкодії та обсягу передаваних даних.

Ще однією характерною особливістю шини I²C є використання виходів із відкритим колектором або відкритим стоком. Це означає, що пристрої не формують високий логічний рівень самостійно, а використовують зовнішні підтягувальні резистори до напруги живлення. Така схема дозволяє безпечно підключати до однієї лінії декілька пристроїв одночасно та реалізовувати механізм арбітражу, коли декілька ведучих пристроїв намагаються отримати доступ до шини. У разі конфлікту спеціальний алгоритм автоматично визначає пріоритет доступу та запобігає виникненню помилок передачі.

У комп'ютерній системі контролю якості зберігання зерна шина I²C використовується для взаємодії між мікроконтролером Arduino Pro Mini та периферійними пристроями. Через цей інтерфейс може здійснюватися обмін даними з лазерним далекоміром LIDAR-Lite v3, цифровими датчиками температури та вологості, модулями реального часу, енергонезалежною пам'яттю та іншими допоміжними компонентами системи. Завдяки використанню спільної двопровідної шини значно спрощується структура електричних з'єднань, підвищується надійність роботи та забезпечується

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливість подальшого розширення функціональних можливостей системи без істотних змін апаратної частини.

Особливо важливою перевагою І²С для систем моніторингу є простота програмної реалізації. Практично всі сучасні мікроконтролери мають вбудовані апаратні модулі підтримки І²С, що дозволяє виконувати передачу даних без значного навантаження на центральний процесор. Крім того, для більшості популярних датчиків та модулів існують готові програмні бібліотеки, які значно спрощують розробку програмного забезпечення та скорочують час створення системи.

Таким чином, основними особливостями шини І²С є використання лише двох сигнальних ліній для передачі даних, підтримка адресації великої кількості пристроїв, наявність механізмів підтвердження передачі та арбітражу, можливість роботи в різних швидкісних режимах, висока надійність обміну інформацією та простота інтеграції з сучасними мікроконтролерами. Завдяки цим перевагам інтерфейс І²С широко використовується в системах автоматизації, вимірювальній техніці та вбудованих комп'ютерних системах, зокрема у системах контролю якості зберігання зерна в елеваторах.

2.3.2 Управління сервоприводами за допомогою ШІМ сигналів.

Управління сервоприводами за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ, PWM – Pulse Width Modulation) є одним із найбільш поширених способів точного позиціонування механічних виконавчих пристроїв у системах автоматизації, робототехніці та комп'ютеризованих системах керування. Принцип роботи такого способу керування полягає в передачі на сервопривід спеціальної послідовності прямокутних імпульсів, параметри яких визначають необхідне положення вихідного вала. На відміну від звичайних електродвигунів постійного струму, де ШІМ використовується переважно для регулювання швидкості обертання, у сервоприводах ширина імпульсу задає конкретний кут повороту вала.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Типовий сервопривід складається з електродвигуна постійного струму, редуктора, потенціометра зворотного зв'язку та електронного блоку керування. Потенціометр безперервно контролює поточне положення вихідного вала та передає інформацію до внутрішньої схеми керування. Коли на вхід сервопривода надходить ШІМ-сигнал, електроніка визначає необхідне положення вала відповідно до тривалості імпульсу та порівнює його з фактичним положенням, отриманим від датчика зворотного зв'язку. Якщо між заданим і фактичним положенням існує різниця, двигун починає обертатися в потрібному напрямку до моменту досягнення необхідного кута. Після цього двигун автоматично зупиняється та підтримує вал у заданому положенні.

Для більшості стандартних сервоприводів використовується період повторення сигналу близько 20 мс, що відповідає частоті приблизно 50 Гц. У середині кожного періоду передається один керуючий імпульс певної тривалості. Зазвичай імпульс тривалістю близько 1 мс відповідає крайньому лівому положенню вала, приблизно 1,5 мс — центральному положенню, а імпульс близько 2 мс — крайньому правому положенню. У багатьох сучасних сервоприводах діапазон може бути розширений від 0,5 до 2,5 мс, що дозволяє отримувати більший кут повороту. Таким чином зміна ширини імпульсу без зміни частоти сигналу дозволяє плавно задавати необхідне положення виконавчого механізму.

Формування ШІМ-сигналів зазвичай здійснюється мікроконтролером. У системі контролю якості зберігання зерна для цього може використовуватися мікроконтролер Arduino Pro Mini, який має вбудовані апаратні таймери та модулі генерації PWM-сигналів. Програмне забезпечення задає необхідну тривалість імпульсу залежно від команди позиціонування, після чого апаратні таймери автоматично формують відповідний сигнал на вихідному контакті мікроконтролера. Такий підхід забезпечує високу точність керування та мінімізує навантаження на центральний процесор.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У запропонованій системі моніторингу зерносховища сервоприводи можуть використовуватися для керування поворотним механізмом тепловізора Seek Thermal Mosaic Core, відеокамери IMX335 та лазерного далекоміра LIDAR-Lite v3. Змінюючи тривалість ШІМ-імпульсів, мікроконтролер задає необхідний кут повороту платформи по горизонтальній та вертикальній осях. Це дозволяє автоматично сканувати всю поверхню зернової маси, формувати теплові карти великих площ та виконувати точне позиціонування вимірювальних пристроїв у потрібну точку контролю. Завдяки наявності внутрішнього зворотного зв'язку сервоприводи забезпечують високу точність позиціонування та стабільне утримання заданого положення навіть при зміні навантаження.

Однією з важливих переваг використання ШІМ-керування є простота реалізації та висока завадостійкість. Для керування сервоприводом необхідна лише одна сигнальна лінія та джерело живлення, що значно спрощує електричну схему системи. Крім того, цифровий характер передачі команд забезпечує високу точність відтворення заданого кута повороту та стійкість до впливу електромагнітних завад, які можуть виникати в промислових умовах роботи елеватора.

Таким чином, принцип управління сервоприводами за допомогою ШІМ-сигналів базується на передачі імпульсів визначеної тривалості, які задають необхідне положення вихідного вала. Внутрішня система зворотного зв'язку сервопривода забезпечує автоматичне досягнення та утримання заданого кута повороту. Завдяки простоті реалізації, високій точності позиціонування, надійності та можливості безпосереднього підключення до мікроконтролерів, ШІМ-керування є ефективним рішенням для автоматизованих систем сканування та позиціонування, зокрема в комп'ютерних системах контролю якості зберігання зерна в елеваторах.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Опис використовуваних бібліотек

Для розробки програмного забезпечення мікроконтролера Arduino Pro Mini у складі комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна необхідно використовувати набір стандартних та спеціалізованих бібліотек, які забезпечують взаємодію з лазерним далекоміром LIDAR-Lite v3, сервоприводами позиціонування, послідовним інтерфейсом зв'язку з комп'ютером та допоміжними функціями обробки даних. Основною бібліотекою є Wire.h, яка реалізує підтримку інтерфейсу ІС (Inter-Integrated Circuit) і використовується для обміну даними між мікроконтролером та далекоміром LIDAR-Lite v3. Дана бібліотека входить до стандартного складу Arduino IDE та забезпечує формування команд читання і запису регістрів пристрою, передачу службових команд, отримання результатів вимірювання відстані та контроль стану датчика. Завдяки використанню Wire.h програміст отримує можливість працювати з шиною ІС на високому рівні без необхідності безпосереднього керування апаратними регістрами мікроконтролера.

Для роботи з лазерним далекоміром доцільно використовувати також спеціалізовану бібліотеку LIDARLite або LIDARLite_v3, яка побудована на основі Wire.h і містить готові функції ініціалізації датчика, запуску вимірювань, зчитування поточного значення дистанції та обробки можливих помилок зв'язку. Використання даної бібліотеки значно спрощує процес розробки програмного забезпечення, оскільки усуває необхідність безпосередньої роботи з регістрами LIDAR-Lite v3 та дозволяє отримувати результати вимірювання за допомогою простих функціональних викликів.

Для керування цифровими мікросервоприводами використовується стандартна бібліотека Servo.h. Вона забезпечує автоматичне формування ШІМ-сигналів з необхідною тривалістю імпульсів для позиціонування сервоприводів у заданий кут. Бібліотека дозволяє підключати декілька сервоприводів одночасно, задавати їх положення в градусах або у вигляді тривалості

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керуючого імпульсу в мікросекундах, плавно переміщати виконавчі механізми та підтримувати стабільне позиціонування. У запропонованій системі Servo.h використовується для керування горизонтальним і вертикальним поворотом тепловізора, відеокамери та лазерного далекоміра під час сканування поверхні зернової маси. Бібліотека автоматично використовує апаратні таймери мікроконтролера ATmega328P для генерації сигналів з частотою близько 50 Гц, що відповідає вимогам більшості стандартних сервоприводів.

Для обміну даними між Arduino Pro Mini та персональним комп'ютером через перехідник UART-USB використовується стандартна бібліотека HardwareSerial, яка реалізована у вигляді об'єкта Serial. Дана бібліотека забезпечує передачу та прийом текстових або двійкових даних через апаратний UART мікроконтролера. За допомогою функцій Serial.begin(), Serial.print(), Serial.println(), Serial.read() та інших здійснюється передача на комп'ютер інформації про поточну дистанцію до поверхні зерна, координати сканування, положення сервоприводів та службові повідомлення. Через цей же інтерфейс комп'ютер передає мікроконтролеру параметри сканування, зокрема крок переміщення сервоприводів, кількість позицій сканування та інші команди керування системою.

Для обробки параметрів, отриманих від комп'ютера через послідовний порт, доцільно використовувати стандартні бібліотеки String.h або функції роботи з масивами символів. Вони забезпечують розбір команд керування, виділення числових параметрів та формування структур даних для подальшої роботи програми. Якщо передача інформації здійснюється у форматі JSON або інших структурованих форматах, може використовуватися додаткова бібліотека ArduinoJson. Вона дозволяє ефективно виконувати кодування та декодування структурованих повідомлень між комп'ютером та мікроконтролером.

Для реалізації алгоритму автоматичного сканування поверхні зерна також можуть використовуватися стандартні бібліотеки EEPROM.h та TimerOne.h. Бібліотека EEPROM.h забезпечує збереження налаштувань системи в

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергонезалежній пам'яті мікроконтролера, що дозволяє відновлювати параметри роботи після перезавантаження пристрою. Бібліотека TimerOne.h надає можливість більш гнучкого використання апаратних таймерів для організації періодичних вимірювань, синхронізації процесу сканування та виконання допоміжних функцій реального часу.

Таким чином, для програмної реалізації запропонованої системи доцільно використовувати бібліотеки Wire.h для роботи з інтерфейсом I²C та далекоміром LIDAR-Lite v3, LIDARLite або LIDARLite_v3 для спрощення взаємодії з лазерним датчиком відстані, Servo.h для керування сервоприводами позиціонування, HardwareSerial (Serial) для організації обміну даними з комп'ютером через UART-USB, EEPROM.h для збереження налаштувань системи та, за необхідності, ArduinoJson і TimerOne для обробки структурованих повідомлень та реалізації функцій реального часу. Сукупність цих бібліотек забезпечує повноцінну реалізацію алгоритму автоматичного сканування поверхні зерна, збору даних про відстань до зернової маси, керування виконавчими механізмами та передачі інформації до комп'ютерної системи моніторингу.

2.5 Проектування алгоритму роботи комп'ютерної системи

Блок схема алгоритму роботи комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі наведена на рис.2.9. Після включення комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі виконує ініціалізацію шини I²C та далі виконує вимірювання відстані до поверхні зерна за допомогою лідара. Отримані виміри надсилаються до ПК який повертає розраховані параметри про крок сканування і кількість кадрів сканування.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

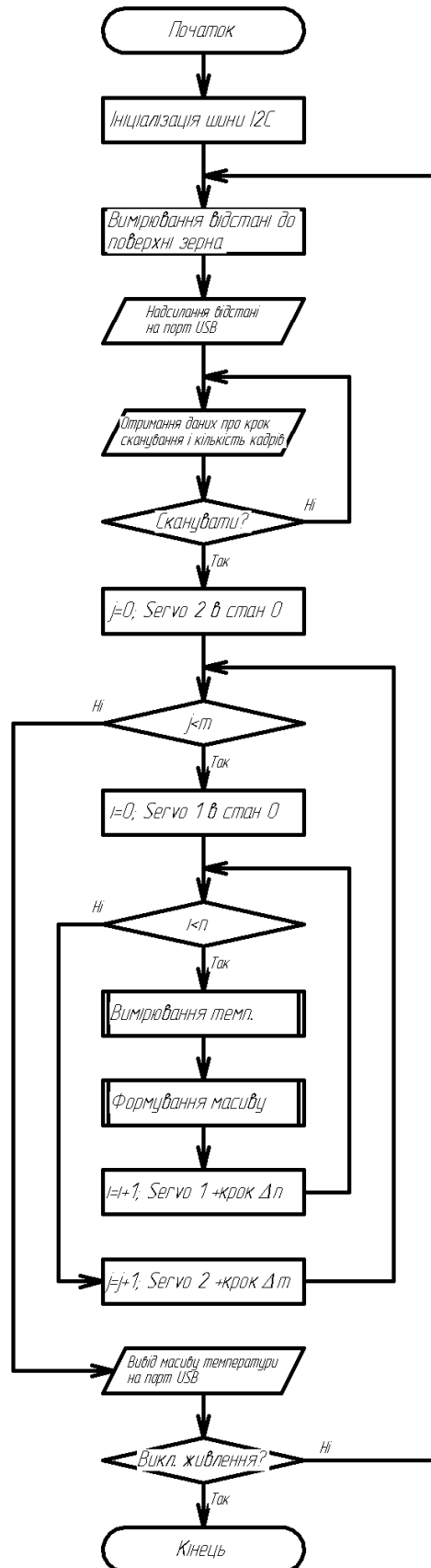


Рисунок 2.9 – Блок схема алгоритму роботи комп’ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

При отриманні команди сканувати і параметрів сканування, мікроконтролер виставляє сервомотори в стартовий стан згідно надісланого кута, і починає сканувати. Після кожного отриманого зображення відбувається переміщення тепловізійної та USB камер зліва на право на заданий кут. Після кожного вимірювання параметри температури складаються в цілісний кадр поверхні зерна та аналізуються на ПК, і відображається на його екрані.

Після надсилання зображень скануюча система повертається до вимірювання відстані до поверхні зерна та очікування команди від ПК, тобто опитує USB порт про команду на сканування. Програма на ПК за розмірами бункера задає параметри сканування.

Сканування при потребі виконується з перекриваннями зон вимірювання, що дає більш згладжену картинку тепловізійного зображення.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Підключення і налаштування модулів

Налаштування роботи комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі починається з покрокового підключення і налаштування модуля лідара та сервоприводів. Зпочатку підключаємо сервоприводи.

Схема підключення сервоприводів до Arduino PRO Mini на рисунку 3.1.

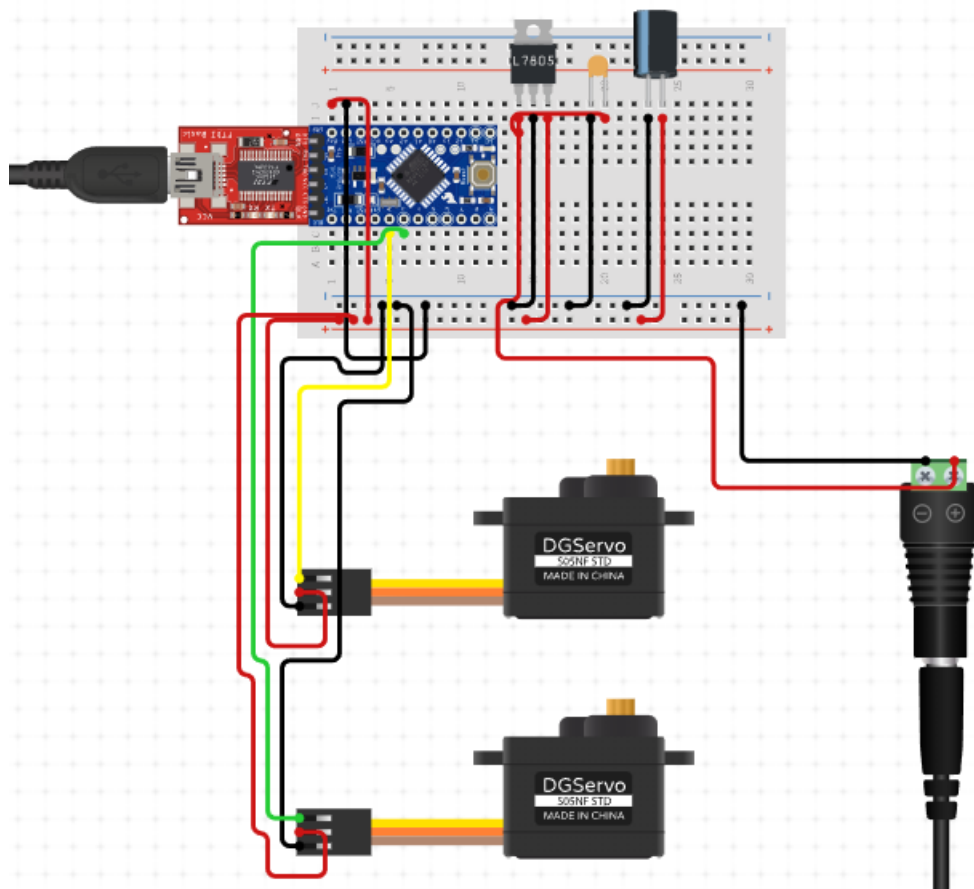


Рисунок 3.1 – Схема підключення сервоприводів до Arduino PRO Mini

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ			
Розроб.		Калиновський			Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі Пояснююча записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Лецишин Ю.З.					43	64
Н. Контр.		Тили С.В.				ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41		
Затверд.		Осухівська Г.М.						

Далі підключаємо модуль лідара на рисунку 3.2.

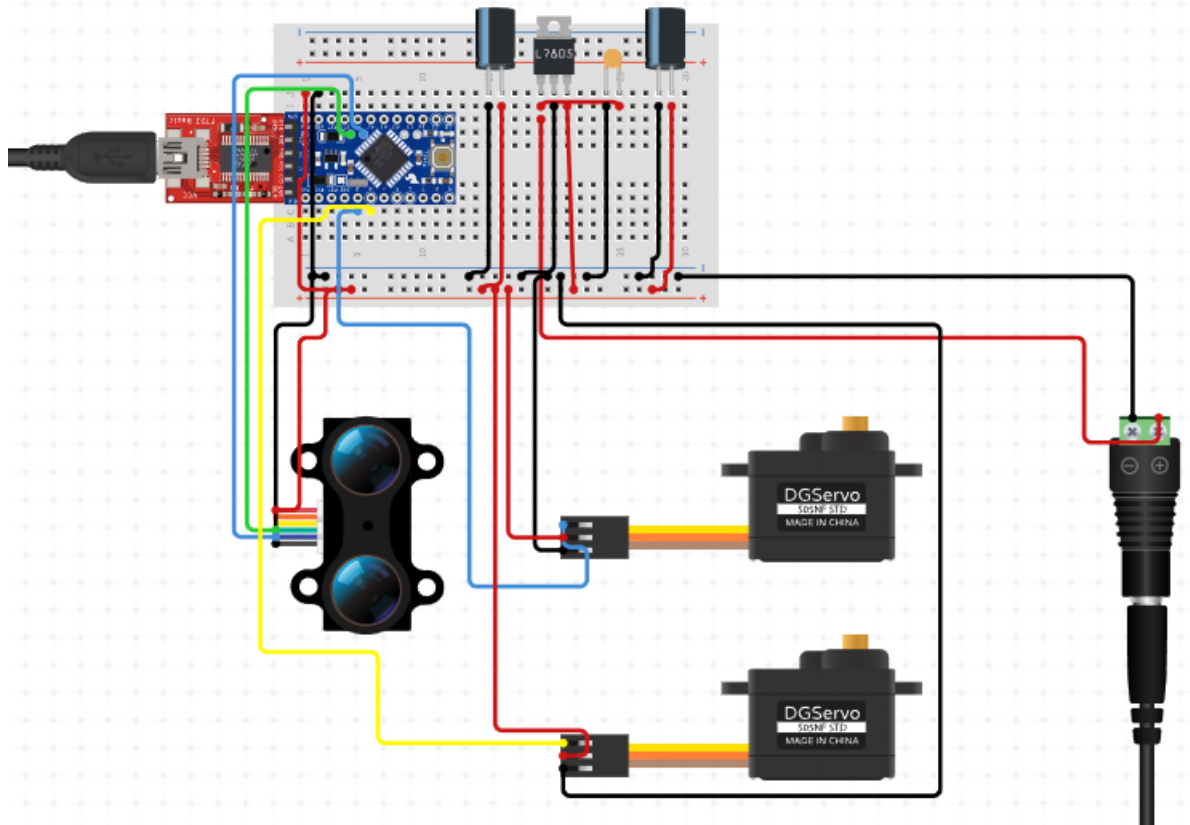


Рисунок 3.2 – Схема підключення модуля лідара до Arduino PRO Mini

Модуль лідара LIDAR-Lite v3 підключається до плати мікроконтролера Arduino PRO Mini до виводів що відповідають шині I2C.

3.2 Опис основної програми роботи системи

Детальне пояснення коду по основних частинах що реалізують роботу комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі наведено нижче.

1. Підключення бібліотек

```
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <LIDARLite.h>
#include <Servo.h>
```

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

інтервал автоматичного надсилання відстані на ПК, у цьому випадку один раз на секунду. `ASK_TIMEOUT` визначає час очікування підтвердження від ПК після кожної позиції сканування, тобто 10 секунд.

4. Створення об'єктів

```
LIDARLite lidarLite;  
Servo servoX;  
Servo servoY;
```

Тут створюються об'єкти для роботи з обладнанням. Об'єкт `lidarLite` відповідає за лазерний далекомір. Об'єкти `servoX` і `servoY` відповідають за два сервоприводи поворотного механізму.

5. Глобальні змінні (див. рис.3.4)

```
int currentDistance = 0;  
unsigned long lastDistanceSendTime = 0;  
  
int homeX = DEFAULT_HOME_X;  
int homeY = DEFAULT_HOME_Y;  
  
char inputBuffer[80];  
byte inputIndex = 0;
```

Рисунок 3.4 – Лістинг коду задання глобальних змінних

`currentDistance` зберігає останнє вимірне значення відстані до поверхні зерна. `lastDistanceSendTime` використовується для контролю часу, щоб не надсилати відстань постійно, а робити це з певним інтервалом. `homeX` і `homeY` зберігають домашнє положення сервоприводів. `inputBuffer` — це буфер для приймання команд від комп'ютера через USB-UART. `inputIndex` показує, скільки символів уже записано в буфер.

6. Функція підключення сервоприводів

```
void attachServos()  
{  
    if (!servoX.attached()) servoX.attach(SERVO_X_PIN);  
    if (!servoY.attached()) servoY.attach(SERVO_Y_PIN);  
}
```

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця функція підключає обидва сервоприводи до відповідних пінів Arduino. Перевірка `attached()` потрібна для того, щоб повторно не підключати сервопривід, якщо він уже активний.

7. Функція відключення сервоприводів

```
void detachServos()
{
    servoX.detach();
    servoY.detach();
}
```

Ця функція відключає сервоприводи від керуючих сигналів. Це може зменшити споживання енергії та прибрати зайве тремтіння сервоприводів після завершення руху. Але потрібно враховувати, що після `detach()` сервопривід може не утримувати положення під навантаженням.

8. Обмеження кута повороту

```
int limitAngle(int angle)
{
    if (angle < MIN_SERVO_ANGLE) return MIN_SERVO_ANGLE;
    if (angle > MAX_SERVO_ANGLE) return MAX_SERVO_ANGLE;
    return angle;
}
```

Ця функція захищає сервоприводи від виходу за допустимі межі. Якщо з ПК випадково прийде кут менше 0 або більше 180 градусів, функція обмежить його безпечним значенням.

9. Переміщення сервоприводів (див. рис.3.5)

```
void moveServos(int angleX, int angleY, int pauseMs)
{
    attachServos();

    angleX = limitAngle(angleX);
    angleY = limitAngle(angleY);

    servoX.write(angleX);
    servoY.write(angleY);

    delay(pauseMs);
}
```

Рисунок 3.5 – Лістинг коду керування сервоприводами

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Функція `moveServos()` встановлює камери у потрібне положення. Спочатку сервоприводи активуються, потім кути перевіряються на допустимість, після чого подаються команди повороту. Затримка `pauseMs` потрібна для того, щоб сервоприводи встигли фізично переміститися і камера стабілізувалася перед зйомкою.

10. Вимірювання відстані

```
int readDistance()
{
    int distance = lidarLite.distance();
    return distance;
}
```

Ця функція виконує вимірювання відстані за допомогою LIDAR-Lite v3. Результат повертається в сантиметрах. Ці дані потрібні комп'ютеру для розрахунку параметрів сканування: кроку повороту, кількості кадрів і меж огляду.

11. Надсилання відстані на ПК

```
void sendDistance()
{
    currentDistance = readDistance();

    Serial.print("DIST ");
    Serial.print(currentDistance);
    Serial.println(" cm");
}
```

Функція вимірює поточну відстань і надсилає її на комп'ютер у текстовому форматі, наприклад:

```
DIST 3000 cm
```

ПК приймає це значення, аналізує його та на основі розмірів бункера обчислює параметри майбутнього сканування.

12. Повернення в початкове положення

```
void goHome()
{
    moveServos(homeX, homeY, 500);
    detachServos();
    Serial.println("HOME_OK");
}
```

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Функція goHome () переводить сервоприводи у початкове положення. Після цього сервоприводи відключаються, а на ПК надсилається повідомлення HOME_OK.

13. Очікування підтвердження від ПК (див. рис.3.6)

```
bool waitForAck()
{
    unsigned long startTime = millis();
    String command = "";

    while (millis() - startTime < ACK_TIMEOUT)
    {
        if (Serial.available())
        {
            command = Serial.readStringUntil('\n');
            command.trim();

            if (command == "ACK")
            {
                return true;
            }

            if (command == "STOP")
            {
                Serial.println("SCAN_STOPPED");
                return false;
            }
        }
    }

    Serial.println("ACK_TIMEOUT");
    return false;
}
```

Рисунок 3.6 – Лістинг коду очікування підтвердження від ПК

Після кожного повороту камери Arduino надсилає повідомлення FRAME, а комп'ютер повинен зробити знімок тепловізором і USB-камерою. Після завершення зйомки ПК надсилає команду ACK. Це означає, що кадр отримано і Arduino може переходити до наступної позиції. Якщо ПК надсилає STOP, сканування припиняється. Якщо протягом 10 секунд підтвердження не прийшло, виникає помилка ACK_TIMEOUT.

14. Основна функція сканування

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
void scanSurface(int startX, int stepX, int countX, int
startY, int stepY, int countY, int pauseMs)
```

Ця функція виконує повне сканування поверхні зерна. Вона приймає стартові кути, кроки повороту, кількість кадрів по горизонталі та вертикалі, а також затримку після кожного переміщення.

Наприклад, команда:

```
SCAN 20 5 10 20 5 8 500
```

означає, що сканування почнеться з кута $X = 20^\circ$, крок по X буде 5° , кількість кадрів у рядку — 10. По вертикалі стартовий кут $Y = 20^\circ$, крок $Y = 5^\circ$, кількість рядків — 8. Після кожного повороту система чекатиме 500 мс.

15. Принцип сканування по рядках

У функції `scanSurface()` використовується послідовне сканування рядків. Спочатку камера проходить перший рядок зліва направо, потім переходить на наступний рядок і рухається справа наліво. Такий спосіб називається змійковим або зигзагоподібним скануванням. Він зменшує зайві переміщення сервоприводів, бо після завершення рядка камера не повертається назад у початок, а одразу продовжує рух у протилежному напрямку.

16. Надсилання повідомлення про кадр

На кожній позиції Arduino надсилає повідомлення такого типу:

```
FRAME ROW=0 COL=1 X=25 Y=20 DIST=3000
```

Це означає, що система знаходиться в рядку 0, стовпці 1, кут сервопривода по X становить 25° , кут по Y — 20° , а остання виміряна відстань до зерна — 3000 см. ПК використовує ці дані для прив'язки зображення до координат поверхні зерна.

17. Завершення сканування

Після проходження всіх рядків і стовпців виконується команда:

```
goHome();
```

```
Serial.println("SCAN_DONE");
```

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сервоприводи повертаються в початкове положення, а комп'ютер отримує повідомлення SCAN_DONE, яке означає завершення повного циклу сканування.

18. Обробка команд від ПК

```
void processCommand(char *command)
```

Ця функція аналізує команди, які надходять від ПК. Вона підтримує такі команди:

MEASURE

Виконати разове вимірювання відстані.

HOME

Повернути сервоприводи в початкове положення.

```
SCAN startX stepX countX startY stepY countY pauseMs
```

Запустити сканування з заданими параметрами.

Якщо команда неправильна, Arduino надсилає повідомлення:

```
ERROR UNKNOWN_COMMAND
```

або

```
ERROR BAD_SCAN_COMMAND
```

19. Розбір параметрів команди SCAN (див. рис.3.7)

```
int params[7];

for (int i = 0; i < 7; i++)
{
    token = strtok(NULL, " ");
    if (token == NULL)
    {
        Serial.println("ERROR BAD_SCAN_COMMAND");
        return;
    }

    params[i] = atoi(token);
}
}
```

Рисунок 3.7 – Лістинг коду команди SCAN

Цей фрагмент розбиває команду SCAN на окремі числові параметри. Функція strtok() відділяє частини рядка за пробілами, а atoi() перетворює текст у число.

20. Приймання даних із послідовного порту (див. рис.3.8)

```
void readSerialCommand()
{
    while (Serial.available())
    {
        char c = Serial.read();

        if (c == '\n' || c == '\r')
        {
            if (inputIndex > 0)
            {
                inputBuffer[inputIndex] = '\0';
                processCommand(inputBuffer);
                inputIndex = 0;
            }
        }
        else
        {
            if (inputIndex < sizeof(inputBuffer) - 1)
            {
                inputBuffer[inputIndex++] = c;
            }
        }
    }
}
```

Рисунок 3.8 – Лістинг коду приймання даних із послідовного порту

Ця функція постійно перевіряє, чи надійшли нові символи від ПК. Символи записуються в буфер до моменту появи символу нового рядка \n або \r. Після цього зібраний рядок передається у функцію processCommand().

21. Функція setup() (див. рис.3.9)

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після ввімкнення живлення Arduino ініціалізує UART, I2C, LIDAR-Lite v3 і сервоприводи. Потім система переходить у режим очікування. У цьому режимі вона регулярно вимірює відстань до поверхні зерна та надсилає її на ПК. Комп'ютер на основі отриманої відстані й розмірів бункера розраховує параметри сканування та надсилає команду SCAN. Після отримання цієї команди Arduino встановлює сервоприводи у стартове положення і починає послідовно переміщати камери по заданих кутах. На кожній позиції Arduino повідомляє ПК, що потрібно зробити кадр. ПК отримує зображення з тепловізора та USB-камери, зберігає його, аналізує температуру поверхні зерна і надсилає АСК. Після отримання підтвердження Arduino переходить до наступної позиції. Після завершення всіх кадрів сервоприводи повертаються у початкове положення, а система знову переходить до вимірювання відстані та очікування нової команди від ПК.

3.3 Результати тестування системи

Для підтвердження роботоздатності системи було виконано кілька фотографій у видимому та тепловому спектрі.



Рисунок 3.10 – Фотографії елеватора у видимому та тепловому спектрі

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

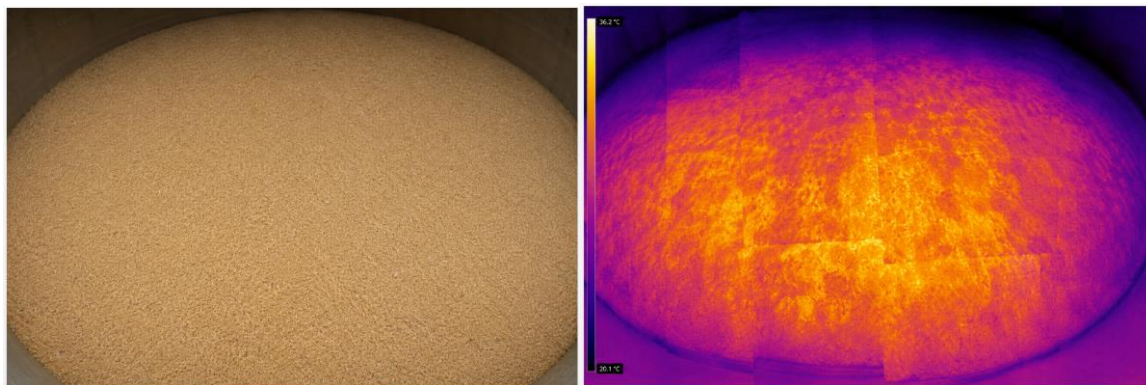


Рисунок 3.4 – Фотографій поверхні зерна у видимому та тепловому спектрі

На фотографії і тепловому спектрі помітно помилки складання (зшивання) кількох зображень, це викликано неточністю роботи сервоприводів, ці неточності можна згладити за допомогою наступного цифрового опрацювання зображень.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1. Долікарська допомога при отруєннях.

Отруєння є одним із найпоширеніших видів нещасних випадків у побуті та на виробництві. Воно виникає внаслідок потрапляння в організм людини отруйних речовин, які порушують нормальну діяльність органів і систем та можуть становити серйозну загрозу для здоров'я і життя. Отруєння можуть бути спричинені неякісними харчовими продуктами, лікарськими препаратами, алкоголем, побутовою хімією, чадним газом, промисловими отрутами, отруйними рослинами або грибами. Залежно від шляху проникнення отрути в організм розрізняють отруєння через травний тракт, дихальні шляхи, шкіру та слизові оболонки. У всіх випадках велике значення має своєчасне надання долікарської допомоги, оскільки від швидкості та правильності дій часто залежить життя потерпілого.

Першочерговим завданням при наданні допомоги є припинення подальшого надходження отруйної речовини в організм. Якщо отруєння сталося внаслідок вдихання токсичних газів або парів, потерпілого необхідно негайно винести або вивести на свіже повітря, розстебнути тісний одяг і забезпечити вільне дихання. Якщо отруйна речовина потрапила на шкіру, її потрібно змити великою кількістю проточної води. У разі потрапляння хімічних речовин в очі їх слід ретельно промивати чистою водою протягом 10–15 хвилин.

Після усунення джерела отруєння необхідно оцінити стан потерпілого. Потрібно перевірити наявність свідомості, дихання та пульсу. Якщо людина непритомна, але дихає, її слід покласти у стабільне бокове положення, щоб запобігти западінню язика та потраплянню блювотних мас у дихальні шляхи.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Калиновський			Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі Пояснююча записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Лецишин Ю.З.					56	64
Н. Контр.		Тили С.В.				ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41		
Затверд.		Осухівська Г.М.						

Якщо дихання або серцебиття відсутні, необхідно негайно розпочати серцево-легеневу реанімацію та продовжувати її до прибуття медичних працівників або відновлення життєвих функцій.

У випадку отруєння через травний тракт важливо якомога швидше видалити отруйну речовину зі шлунка. Якщо потерпілий перебуває при свідомості та може ковтати, йому дають випити кілька склянок чистої води, після чого можна викликати блювання шляхом подразнення кореня язика. Однак цей метод дозволяється застосовувати не в усіх випадках. Категорично забороняється викликати блювання при отруєнні кислотами, лугами, бензином, гасом та іншими нафтопродуктами, оскільки це може спричинити додаткові опіки стравоходу та дихальних шляхів. Також не можна викликати блювання у непритомних осіб через високий ризик задухи.

Для зменшення всмоктування токсичних речовин рекомендується застосовувати сорбенти. Найпоширенішим засобом є активоване вугілля, яке приймають із розрахунку приблизно одна таблетка на 10 кілограмів маси тіла. Сорбенти зв'язують частину токсинів у травному тракті та сприяють їх виведенню з організму. Крім того, потерпілому можна давати достатню кількість води, якщо це не протипоказано характером отруєння.

Особливо небезпечними є отруєння чадним газом, які часто виникають під час пожеж або несправності опалювальних приладів. Ознаками такого отруєння можуть бути головний біль, запаморочення, слабкість, нудота, порушення координації рухів і втрата свідомості. У цьому випадку потерпілого необхідно негайно винести на свіже повітря, забезпечити доступ кисню, зігріти та викликати швидку медичну допомогу.

Незалежно від виду отруєння обов'язковим є виклик екстреної медичної допомоги. Під час очікування лікарів потрібно уважно спостерігати за станом потерпілого, контролювати дихання та свідомість. Бажано зберегти упаковки від ліків, залишки їжі, напоїв або хімічних речовин, які могли стати причиною

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

отруєння, оскільки це допоможе медикам швидше встановити вид токсичної речовини та призначити відповідне лікування.

Отже, долікарська допомога при отруєннях полягає у швидкому припиненні дії отрути, підтриманні життєво важливих функцій організму, запобіганні подальшому всмоктуванню токсичних речовин та своєчасному зверненні за кваліфікованою медичною допомогою. Знання правил надання такої допомоги є важливим елементом безпеки життєдіяльності та може врятувати людське життя в екстреній ситуації.

4.2. Загальні вимоги безпеки з охорони праці для користувачів ПК

Сучасна професійна діяльність значної частини працівників пов'язана з використанням персональних комп'ютерів, тому питання охорони праці під час роботи з ПК є надзвичайно актуальним. Незважаючи на те, що комп'ютерна техніка не належить до обладнання підвищеної небезпеки, тривала робота за комп'ютером може негативно впливати на здоров'я людини та створювати ризик виникнення виробничих травм і професійних захворювань. Загальні вимоги безпеки з охорони праці для користувачів ПК спрямовані на забезпечення безпечних та комфортних умов праці, збереження працездатності працівників і запобігання негативному впливу виробничих факторів.

До роботи з персональним комп'ютером допускаються особи, які пройшли відповідний інструктаж з охорони праці, ознайомлені з правилами безпечної експлуатації обладнання та дотримуються встановлених вимог безпеки. Працівник повинен знати порядок дій у разі виникнення аварійних ситуацій, правила користування первинними засобами пожежогасіння та вміти надавати домедичну допомогу потерпілим.

Перед початком роботи необхідно перевірити справність комп'ютерного обладнання, цілісність електричних кабелів, вилок, розеток та інших елементів електроживлення. Робоче місце повинно бути чистим, добре освітленим і

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впорядкованим. Не допускається захарашення проходів сторонніми предметами, а також розміщення на робочому столі легкозаймистих матеріалів або ємностей із рідинами поблизу електрообладнання. Важливе значення має правильна організація робочого місця. Монітор слід розташовувати на відстані приблизно 50–70 сантиметрів від очей користувача, причому верхня межа екрана повинна знаходитися на рівні очей або трохи нижче. Клавіатура та миша мають розміщуватися таким чином, щоб забезпечувати природне положення рук і мінімізувати навантаження на кисті та суглоби.

Під час роботи користувач повинен дотримуватися правильної робочої пози. Спина має спиратися на спинку крісла, ноги — стояти на підлозі або спеціальній підставці, а руки — вільно розташовуватися на робочій поверхні. Тривале перебування в одному положенні може призвести до порушення кровообігу, розвитку захворювань опорно-рухового апарату та швидкої втоми. Для запобігання цим негативним явищам необхідно регулярно змінювати положення тіла та виконувати нескладні фізичні вправи.

Особливу увагу слід приділяти режиму праці та відпочинку. Безперервна робота за комп'ютером викликає значне навантаження на органи зору та нервову систему. Тому рекомендується робити короткі перерви через кожні 45–60 хвилин роботи, під час яких доцільно виконувати вправи для очей, розминку для м'язів шиї, плечей, спини та рук. Це допомагає знизити втому, підтримувати працездатність і запобігати виникненню професійних захворювань.

Під час експлуатації комп'ютерної техніки забороняється торкатися оголених проводів, самостійно ремонтувати електрообладнання, працювати з несправними пристроями або використовувати обладнання з пошкодженою ізоляцією. Не можна підключати чи відключати електричні пристрої мокрими руками, а також розміщувати на комп'ютері чи поруч із ним ємності з водою та іншими рідинами. У разі появи запаху горілої ізоляції, диму, іскор або інших

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ознак несправності необхідно негайно припинити роботу, вимкнути обладнання від електромережі та повідомити відповідальну особу.

Важливою складовою охорони праці є забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов. У приміщенні повинні підтримуватися оптимальна температура, вологість повітря та рівень освітлення. Не допускається виникнення відблисків на екрані монітора, оскільки вони спричиняють додаткове навантаження на зір. Для освітлення робочого місця бажано використовувати поєднання природного та штучного світла, яке забезпечує комфортні умови для роботи.

Після закінчення роботи необхідно правильно завершити роботу програмного забезпечення, вимкнути комп'ютер і периферійні пристрої відповідно до встановленого порядку, привести робоче місце до належного стану та повідомити керівника або відповідальну особу про всі виявлені несправності. Дотримання вимог охорони праці під час роботи з персональним комп'ютером сприяє збереженню здоров'я працівників, підвищенню ефективності праці та запобіганню виникненню аварійних ситуацій і нещасних випадків.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було розроблено комп'ютерну систему контролю якості зберігання зерна в елеваторі, що призначена для створення тепловізійного зображення поверхні зерна в елеваторі для виявлення осередків само розігріву зерна. Зображення формується за допомогою двох камер, одна тепловізійна, а інша видимого спектру, що керуються з ПК і повертаються за допомогою механізму що керується платою Arduino PRO Mini.

У першому розділі проводиться аналіз технічного завдання, та складаються вимоги до комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі та аналіз можливих рішень.

В другому розділі описується процес проектування та реалізації комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі. Приводиться обґрунтування апаратного забезпечення та побудова структури системи. Розглядаються бібліотеки написання коду на основі побудованого алгоритму роботи системи.

В третьому розділі проводиться апаратна симуляція та програмна реалізація та тестування комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі в реальних умовах експлуатації. Тестування розробленої комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі підтвердило її працездатність.

Четвертий розділ описує безпеку життєдіяльності, основи охорони праці.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Систми контролю за процесом зберігання зернової маси. URL: Arduino Pro Mini. Arduino Documentation. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardProMini> (дата звернення: 08.06.2026).
2. ATmega328P Datasheet / Microchip Technology Inc. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf (дата звернення: 08.06.2026).
3. LIDAR-Lite v3. Operation Manual and Technical Specifications / Garmin Ltd. URL: https://static.garmin.com/pumac/LIDAR_Lite_v3_Operation_Manual_and_Technical_Specifications.pdf (дата звернення: 08.06.2026).
4. Sony IMX335LQN CMOS Image Sensor Flyer / Sony Semiconductor Solutions Corporation. URL: https://www.sony-semicon.com/files/62/flyer_security/IMX335LQN_Flyer.pdf (дата звернення: 08.06.2026).
5. Seek Thermal Mosaic Core Thermal Camera Module Datasheet // Seek Thermal. URL: <https://www.thermal.com/mosaic-core-320x240-9mm.html> (дата звернення: 08.06.2026).
6. Monk S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. – 3rd ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2020. – 192 p.
7. Blum J. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry. – 2nd ed. – Indianapolis : Wiley, 2019. – 528 p.
8. Wilmshurst T. Designing Embedded Systems with Arduino. – Oxford : Newnes, 2019. – 420 p.
9. Axelson J. Embedded Ethernet and Internet Complete. – Madison : Lakeview Research, 2019. – 640 p.
10. Ковальчук В. П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв. – Київ : Видавництво Ліра-К, 2021. – 392 с.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

11. Жаровський Р.О., Луцик Н.С., Осухівська Г.М., Паламар А.М., Тиш Є.В. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 39 с.

12. Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ. 2019. 150 с.

13. Voloskyi V., Leshchyshyn Y., Romanyshyn N., Palamar A., Tarasenko L. Method and algorithm for efficient cell balancing in the lithium-ion battery control system. CEUR Workshop Proceedings, The 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024), Zboriv, Ukraine, October 02-04, 2024. Vol. 3842. P. 258-267.

14. Лецишин Ю.З., Романишин Н.Р., Наконечний В.В., Паламарчук А.О. Розробка системи зв'язку як інтегрованого елементу роботизованих систем. Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції. Збірник тез доповідей XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції. Житомир, 2016. С. 102.

15. Лецишин Ю.З., Назаревич Т.О., Міська І.В. Створення вбудованих систем на базі структурно - параметричних моделей цифрових каналів зв'язку. VIII Науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології». Тернопіль, 2020. С. 127.

16. Leschyshyn Y., Scherbak L., Nazarevych O., Gotovych V., Tymkiv P., Shymchuk G. Multicomponent Model of the Heart Rate Variability Change-point. IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 2019. P. 110–113.

17. Tymkiv P., Leshchyshyn Y. Algorithm Reliability of Kalman Filter Coefficients Determination for Low-Intensity Electroretinosignal. IEEE 15th

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). 2019. P.1-5.

18. Leschyshyn Y., Semchyshyn O. Periodically correlated heart rate variability detection by Neyman - Pearson criterion. 9th International Conference - The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics. 2007. P. 139–140.

19. Геврик Є.О. Охорона праці. К.: Ельга, Ніка-Центр, 2003. 280 с.

					КС КРБ 123.266.00.00 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

«Затверджую»

завідувач кафедри КС

_____ Осухівська Г.М.

" ____ " _____ 2026 р.

Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на __5__ листках

Вид робіт:

Кваліфікаційна робота

На здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

«УЗГОДЖЕНО»

«ВИКОНАВЕЦЬ»

Керівник кваліфікаційної роботи

Студент групи СІс-41

_____ к.т.н., доц. Лещишин Ю.З.

_____ Калиновський В. В.

« ____ » _____ 2026 р.

« ____ » _____ 2026 р

Тернопіль 2026

1. Назва та підстава для виконання роботи.

1.1. Комп'ютерна система контролю якості зберігання зерна в елеваторі.

1.2. Підставою для виконання кваліфікаційної роботи бакалавра (КРБ) є Наказ по Університету (№ 4/9-189 від 24.04.2026р.).

2. Виконавець.

2.1. Студент групи СІс-41 кафедри КС

Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя
Калиновський Владислав Віталійович.

3. Мета роботи.

3.1. Метою роботи є розробити структуру та програмне забезпечення комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі.

4. Склад виробу.

4.1. До складу вимірювача повинні входити:

- 1) безконтактний датчик температури;
- 2) далекомір;
- 3) сервопривід;
- 4) USB-камера;
- 5) мікроконтролер або мікропроцесор;
- 6) комплект документації.

5. Технічні вимоги.

5.1. Вимоги по призначенню.

5.1.1. Комп'ютеризована система повинна мати наступні параметри:

- 1) Діапазон вимірюваної температури, не гірше, °С –
20...+200
 - 2) Точність вимірювання температури, °С
±0,05
 - 3) Кут вимірювання температури, ° 24
 - 4) Дальність зчитування температури, м 0,5-30
- 5.1.2. Роздільна здатність тепловізійного зображення, не менше 30*20
- 5.1.3. Система повинна живитись напругою постійного струму, В
+12±2

5.2. Вимоги до умов експлуатації:

5.2.1. Кліматичні умови експлуатації мають відповідати класу 3К3 (або 3К5) згідно з ДСТУ EN 60721-3-3

5.2.2. Температура експлуатації від 0 до +40°C

5.2.3. Відносна вологість до 100% при t=25°C

5.3. Конструктивні вимоги.

5.3.1. Конструювання корпусу приладу в КРБ не передбачено.

5.3.2. Для побудови системи мають бути використані сучасні компоненти з можливістю поверхневого монтажу друкованого вузла.

5.3.3. При побудові системи необхідно передбачити розміщення роз'ємів живлення і обміну даними.

5.3.4. Габаритні розміри при макетуванні, мм, не більше:

довжина 400

ширина 300

висота

100

5.3.5. Маса макету, кг, не більше

2

5.3.6. Конструкція макету повинна забезпечувати доступ до всіх комплектуючих виробів при тестуванні.

5.4. Вимоги до надійності.

5.4.1. Система повинна відповідати вимогам ДСТУ 2862-94.

5.4.2. Наробка на відмову, не менше 5000 год.

5.5. Вимоги метрології.

5.5.1. Вимірювання параметрів системи при моделюванні повинно виконуватись на універсальних вимірювальних приладах.

6. Економічні показники.

6.1. Собівартість системи повинна бути не більше 98000 грн.

7. Вимоги до документації.

7.1. Конструкторська документація повинна відповідати вимогам ЄСКД, ДСТУ та ГОСТ.

7.2. До складу документації повинно входити:

- 1) ПЗ
- 2) Структурна схема Е1
- 3) Електрична схема Е3
- 4) Модель тестового макета
- 5) Блок схема алгоритму роботи

8. Стадії та етапи розробки КРБ

8.1 Стадії та етапи виконання КРБ наведенні в таблиці 1.

Таблиця 1

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання
1	Розробка технічного завдання	26.01 – 02.02
2	Робота над першим розділом «Аналіз технічного завдання»	03.02 – 15.02
3	Робота над другим розділом «ПРОЄКТНА ЧАСТИНА»	20.04 – 25.04
4	Робота над третім розділом «ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА»	26.04 – 05.05
5	Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	07.05 – 25.05
6	Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	26.05 – 7.06
7	Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами	8.06 – 14.06
8	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06 – 21.06
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	24.06.26

9. В дане ТЗ можуть вноситись зміни по узгодженню сторін.

Додаток Б
Перелік елементів

Додаток В.

Код програми

```
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <LIDARLite.h>
#include <Servo.h>

#define SERVO_X_PIN 2
#define SERVO_Y_PIN 3

#define SERIAL_SPEED 9600
#define LIDAR_CONFIG 0

#define DEFAULT_HOME_X 20
#define DEFAULT_HOME_Y 20

#define MIN_SERVO_ANGLE 0
#define MAX_SERVO_ANGLE 180

#define DISTANCE_SEND_INTERVAL 1000
#define ACK_TIMEOUT 10000

LIDARLite lidarLite;
Servo servoX;
Servo servoY;

int currentDistance = 0;
unsigned long lastDistanceSendTime = 0;

int homeX = DEFAULT_HOME_X;
int homeY = DEFAULT_HOME_Y;

char inputBuffer[80];
byte inputIndex = 0;

void attachServos()
{
    if (!servoX.attached()) servoX.attach(SERVO_X_PIN);
    if (!servoY.attached()) servoY.attach(SERVO_Y_PIN);
}

void detachServos()
{
    servoX.detach();
    servoY.detach();
}

int limitAngle(int angle)
{
    if (angle < MIN_SERVO_ANGLE) return MIN_SERVO_ANGLE;
    if (angle > MAX_SERVO_ANGLE) return MAX_SERVO_ANGLE;
    return angle;
}
```

```

}

void moveServos(int angleX, int angleY, int pauseMs)
{
    attachServos();

    angleX = limitAngle(angleX);
    angleY = limitAngle(angleY);

    servoX.write(angleX);
    servoY.write(angleY);

    delay(pauseMs);
}

int readDistance()
{
    int distance = lidarLite.distance();
    return distance;
}

void sendDistance()
{
    currentDistance = readDistance();

    Serial.print("DIST ");
    Serial.print(currentDistance);
    Serial.println(" cm");
}

void goHome()
{
    moveServos(homeX, homeY, 500);
    detachServos();
    Serial.println("HOME_OK");
}

bool waitForAck()
{
    unsigned long startTime = millis();
    String command = "";

    while (millis() - startTime < ACK_TIMEOUT)
    {
        if (Serial.available())
        {
            command = Serial.readStringUntil('\n');
            command.trim();

            if (command == "ACK")
            {
                return true;
            }
        }
    }
}

```

```

        if (command == "STOP")
        {
            Serial.println("SCAN_STOPPED");
            return false;
        }
    }
}

Serial.println("ACK_TIMEOUT");
return false;
}

void scanSurface(int startX, int stepX, int countX, int startY,
int stepY, int countY, int pauseMs)
{
    Serial.println("SCAN_START");

    attachServos();

    for (int y = 0; y < countY; y++)
    {
        int angleY = startY + y * stepY;

        if (y % 2 == 0)
        {
            for (int x = 0; x < countX; x++)
            {
                int angleX = startX + x * stepX;

                moveServos(angleX, angleY, pauseMs);

                Serial.print("FRAME ");
                Serial.print("ROW=");
                Serial.print(y);
                Serial.print(" COL=");
                Serial.print(x);
                Serial.print(" X=");
                Serial.print(angleX);
                Serial.print(" Y=");
                Serial.print(angleY);
                Serial.print(" DIST=");
                Serial.println(currentDistance);

                if (!waitForAck())
                {
                    goHome();
                    return;
                }
            }
        }
    }
    else
    {
        for (int x = countX - 1; x >= 0; x--)
        {

```

```

    int angleX = startX + x * stepX;

    moveServos(angleX, angleY, pauseMs);

    Serial.print("FRAME ");
    Serial.print("ROW=");
    Serial.print(y);
    Serial.print(" COL=");
    Serial.print(x);
    Serial.print(" X=");
    Serial.print(angleX);
    Serial.print(" Y=");
    Serial.print(angleY);
    Serial.print(" DIST=");
    Serial.println(currentDistance);

    if (!waitForAck())
    {
        goHome();
        return;
    }
}

goHome();
Serial.println("SCAN_DONE");
}

void processCommand(char *command)
{
    char *token = strtok(command, " ");

    if (token == NULL) return;

    if (strcmp(token, "MEASURE") == 0)
    {
        sendDistance();
    }
    else if (strcmp(token, "HOME") == 0)
    {
        goHome();
    }
    else if (strcmp(token, "SCAN") == 0)
    {
        int params[7];

        for (int i = 0; i < 7; i++)
        {
            token = strtok(NULL, " ");
            if (token == NULL)
            {
                Serial.println("ERROR BAD_SCAN_COMMAND");
                return;
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    params[i] = atoi(token);
}

int startX = params[0];
int stepX = params[1];
int countX = params[2];
int startY = params[3];
int stepY = params[4];
int countY = params[5];
int pauseMs = params[6];

if (countX <= 0 || countY <= 0 || pauseMs < 0)
{
    Serial.println("ERROR BAD_PARAMETERS");
    return;
}

scanSurface(startX, stepX, countX, startY, stepY, countY,
pauseMs);
}
else
{
    Serial.println("ERROR UNKNOWN_COMMAND");
}
}

void readSerialCommand()
{
    while (Serial.available())
    {
        char c = Serial.read();

        if (c == '\n' || c == '\r')
        {
            if (inputIndex > 0)
            {
                inputBuffer[inputIndex] = '\0';
                processCommand(inputBuffer);
                inputIndex = 0;
            }
        }
        else
        {
            if (inputIndex < sizeof(inputBuffer) - 1)
            {
                inputBuffer[inputIndex++] = c;
            }
        }
    }
}

void setup()

```

```
{
  Serial.begin(SERIAL_SPEED);

  Wire.begin();

  lidarLite.begin(LIDAR_CONFIG, true);

  attachServos();
  servoX.write(homeX);
  servoY.write(homeY);
  delay(500);
  detachServos();

  Serial.println("SYSTEM_START");
  Serial.println("READY");
}

void loop()
{
  readSerialCommand();

  if (millis() - lastDistanceSendTime >= DISTANCE_SEND_INTERVAL)
  {
    lastDistanceSendTime = millis();
    sendDistance();
  }
}
```