

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій  
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»  
Гарант ОПП

Світлана ГУРКОВСЬКА

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Комп'ютерне конструювання мехатронних систем»  
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

на тему «Автоматизований облік та контроль геометричних  
параметрів спікальних візків випалювальної машини  
**LURGI 552A (B)**»

Керівник роботи

Олег БУНДЗА

Консультант від  
бази практики

Андрій ГАВЕЛЯ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Андрій ЧЕРВЯКОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Андрій ГОЛОЯДОВ

Запоріжжя 2024

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій

Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

ОПП Комп'ютерне конструювання мехатронних систем

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант освітньої програми

«Комп'ютерне конструювання мехатронних систем»

Світлана ГУРКОВСЬКА

(прізвище та ініціали)

(підпис)

«12» липня 2024 р.

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Червякова Андрія Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи (проєкту) Автоматизація обліку та контролю геометричних параметрів спікальних візків випалювальної машини LURGI 552A (B)

керівник роботи (проєкту) Бундза Олег Зіновійович, кандидат технічних наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 01.07.2024р. №162/01.07.2024

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 01.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з галузевого машинобудування, автоматизації; методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи за тематикою досліджень; літературні джерела, технологічні інструкції, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Дослідження предметної галузі (1.1 Процес виробництва залізородних обкотишів, 1.2 Вплив різних факторів на роботу випалювальної машини); 2. Теоретичні дослідження (2.1 Конструкція випалювального візка, 2.2 Матеріал для виготовлення випалювальних візків, 2.3 Прогин випалювального візка, 2.4 Моніторинг прогину випалювальних візків: детальний аналіз; 2.5 Розробка системи моніторингу; 2.6 Міжнародний досвід моніторингу стану спікальних візків на металургійних підприємствах); 3. Програма, методика та результати експериментальних досліджень (3.1 Мета та методи експериментальних досліджень, 3.2 Перелік використаної апаратури, обладнання, 3.3 Результати досліджень із аналізом отриманих результатів; висновки, 3.4 Вибір компонентів системи); 4. Економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованої системи. Висновки. Додатки

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу: \_\_\_\_\_

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Консультант (прізвище, ініціали та посада)
1-4	Бундза О.З., доцент кафедри АБЕРС

7. Дата видачі завдання 05 липня 2024

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проєкту)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	09.09.2024 – 03.11.2024	
2	Розділ 2. Теоретичні дослідження	04.11.2024 – 10.11.2024	
3	Розділ 3. Програма, методика та результати експериментальних досліджень	11.11.2024 – 17.11.2024	
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованих змін	18.11.2024 – 20.11.2024	
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	21.11.2024 – 24.11.2024	
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	25.11.2024 – 27.11.2024	
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	25.11.2024 – 27.11.2024	
8	Рецензування завершеної роботи.	28.11.2024 – 01.12.2024	
8	Захист	02.12.2024 – 07.12.2024	

Здобувач

\_\_\_\_\_

(підпис)

Червяков Андрій Миколайович

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Бундза Олег Зіновійович

(прізвище та ініціали)



## АНОТАЦІЯ

Червяков Андрій Миколайович. Автоматизація обліку та контролю геометричних параметрів спікальних візків випалювальної машини LURGI 552A (B). - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». ОПП «Комп'ютерне конструювання мехатронних систем» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2024.

Об'єктом дослідження є фактори, що впливають на роботу випалювальних візків під час виробництва обкотишів.

Предметом дослідження є закономірності впливу системи автоматизованого обліку та контролю геометричних параметрів на довговічність випалювальних візків.

У першому розділі проаналізована предметна область - технологія виробництва обкотишів в умовах ГЗК. Надана загальна характеристика технологічного процесу. Зроблено огляд ключових технологічних ділянок, їх призначення та наведено перелік їх обладнання. Вказано взаємозв'язок між ділянками. Досліджено вплив різних факторів на роботу випалювальної машини.

У другому розділі розглянуто конструктив випалювального візка, як основного компоненту випалювальної машини, для забезпечення необхідної якості обкотишів. Розглянуто причини та фактори, що впливають на прогин випалювального візка, та які наслідки спостерігаються під час експлуатації з надмірним прогином. Розглянуто сучасні методи моніторингу, та доведено необхідність розробки та впровадження системи автоматичного обліку та контролю геометричних параметрів спікальних візків.

У третьому розділі запропонована концепція системи автоматичного моніторингу випалювальних візків. Проведено експеримент, для підтвердження працездатності запропонованої систем. Виконано огляд існуючих датчиків та підібрані необхідні компоненти для роботи системи.

У четвертому розділі відповідними розрахунками підтверджено економічну доцільність впровадження запропонованої системи автоматичного обліку та контролю геометричних параметрів спікальних візків.

ВИПАЛЮВАЛЬНА МАШИНА, ОБПАЛЮВАЛЬНИЙ ВІЗОК,  
ЗАЛІЗОРУДНІ ОБКОТИШІ, ПРОГИН ВІЗКА, СИСТЕМА  
АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ .....	8
1.1 Процес виробництва залізородних обкотишів .....	8
1.1.1 Відділення приймання та складування компонентів шихти .....	9
1.1.2 Відділення подрібнення бентоніту, вапняку та продукту повертання .....	10
1.1.3 Відділення дозування компонентів шихти .....	12
1.1.4 Відділення огрудкування .....	13
1.1.5 Машина для випалу обкотишів .....	14
1.1.6 Відділення класифікації, складування та відвантаження готової продукції .....	15
1.2 Вплив різних факторів на роботу випалювальної машини .....	16
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	18
2.1 Конструкція випалювального візка .....	18
2.2 Матеріал для виготовлення випалювальних візків .....	19
2.3 Прогин випалювального візка .....	21
2.4 Моніторинг прогину візків: детальний аналіз .....	21
2.4.1 Розуміння проблеми .....	21
2.4.2 Методи моніторингу .....	22
2.5 Розробка системи моніторингу .....	22
2.6 Міжнародний досвід моніторингу стану спікальних візків на металургійних підприємствах .....	23
2.6.1 Приклади реалізації .....	25
3 ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	28
3.1 Мета та методи експериментальних досліджень .....	28
3.2 Перелік використаної апаратури, обладнання .....	29
3.3 Результати досліджень із аналізом отриманих результатів .....	30
3.4 Вибір компонентів системи .....	35
3.4.1 Датчики для вимірювання відстані .....	35
3.4.2 Датчики для ідентифікації візків .....	37
4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ .....	40
ВИСНОВКИ .....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	43
ДОДАТОК А ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАТФОРМИ ARDUINO UNO .....	44
ДОДАТОК Б ПРИКЛАД СКЕТЧУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ .....	45
ДОДАТОК В СКЕТЧ ДЛЯ РОБОТИ СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ПРОГИНУ ВІЗКІВ .....	46
ДОДАТОК Г ІНТЕРФЕЙС СЕРЕДОВИЩА ARDUINO IDE .....	47
ДОДАТОК Д ЗІБРАНА МАКЕТНА СХЕМА .....	48
ДОДАТОК Е ПРИКЛАД РОБОТИ МАКЕТНОЇ СХЕМИ .....	49



## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку металургії чорних металів залізородні окатиші залишаються, поряд з агломератом, основним компонентом шихти доменних печей, а також найбільш поширеною сировиною для процесів прямого відновлення заліза.

Проблема раціонального використання сировинних і паливно-енергетичних ресурсів особливо важлива для енергоємних промислових виробництв. В умовах постійного підвищення цін на пальне та електроенергію виникає ще більша проблема ефективного використання енергетичних ресурсів при високій якості готової продукції металургійної промисловості.

Світові тенденції у сфері металургії вимагають від підприємств постійного вдосконалення та модернізації обладнання для забезпечення високоякісної продукції. В цьому контексті виникає проблематика ефективності та надійності обпалювальних машин, які визначають якість обкотишів і, в кінцевому рахунку, впливають на результативність та собівартість виробництва в цілому.

Складність агрегатів і технологій у значній мірі утруднюють вирішення цих завдань. Одним із таких технологічних агрегатів є випалювальна машина конвеєрного типу (ВМКТ), яка використовується для термічного оброблення залізородних окатишів. Машина являє собою складну енергетичну систему, що забезпечує процес керування термічного оброблення залізородних окатишів, виконаних із дрібнодисперсних концентратів, і вони є одними з найбільш енерговитратних об'єктів аглодоменного переділу [1].


Випалювальна машина є безперервним цепним конвеєром, який складається з 208 випалювальних візків завширшки 4 метри. Випалювальна машина має корисну площу спікання 552 м<sup>2</sup>. Корисна площа випалювальної машини розподілена на окремі технологічні зони, в яких створюються певні температурні та газо-повітряні режими, що забезпечують фізико-хімічні перетворення в обкотишах.

Візок - це рама, що спирається на чотири ролики з поздовжніми балками, на які монтуються колосникові ґрати і поздовжні борти.

На горизонтальній ділянці стрічки візки щільно примикають один до одного, утворюючи жолоб з дном, що рухається, у вигляді колосникових ґрат, що заповнюється шихтою. Тепло, необхідне для спікання, виходить від горіння вуглецевого палива. У зоні горіння температура сягає 1300°C, за якої і відбувається спікання обкотишів [2].

Внаслідок одностороннього підведення тепла у балках візків виникає значний градієнт температур по висоті, що призводить до виникнення прогину рами візка у вертикальній площині та її короблення в горизонтальній площині.

З часом виникає неприпустиме, за умовами роботи, прогинання (короблення) несучих балок рами, а іноді й руйнування її в процесі експлуатації, що може призвести до великих матеріальних втрат.



Враховуючи жорсткі умови експлуатації конвеєрної колосникової машини, щодо спікальних візків потрібно проводити регламентне технічне обслуговування.

Для своєчасної заміни спікальних візків та запобігання аварійних зупинок обладнання, пов'язаних з неприпустимим прогином рами, пропонується запровадити автоматизовану систему контролю геометричних параметрів спікальних візків.

### **Апробація роботи**

Результати роботи було апробовано на наступних конференціях:

1. Червяков А.М., Бундза О.З., Голотюк М.В. Автоматизація обліку та контролю геометричних параметрів спікальних візків випалювальної машини LURGI 552. *Гірничо-металургійний комплекс: інтеграція бізнесу, технологій та освіти: тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції MININGMETALTECH 2024*, м. Запоріжжя, 28–29 листопада 2024 року. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-155>



# 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ

## 1.1 Процес виробництва залізорудних обкотишів

Залізорудні обкотиші є високоякісною сировиною для доменного виробництва сталі. Їхнє виробництво включає кілька послідовних етапів, що забезпечують високу якість та оптимальні характеристики готового продукту.

Основні етапи технологічного процесу виготовлення обкотишів на одному з ГЗК в ЦВО-2:

- 1) підготовка залізорудного концентрату:
  - подрібнена залізна руда збагачується для підвищення вмісту заліза;
  - збагачення здійснюється магнітною сепарацією, яка відокремлює частинки заліза від порожньої породи;
  - отримання концентрату з високим вмістом заліза (60–70%).
- 2) змішування концентрату:
  - до концентрату додають бентонітову глину або інші в'язучі речовини для поліпшення формування обкотишів, що забезпечує міцність сирих обкотишів.
- 3) огрудкування:
  - концентрат подається у гранулятори (тарілчасті огрудковувачі), де він формується у кульки (обкотиші) розміром 10–15 мм.;
  - тарілчасті гранулятори забезпечують рівномірний розмір та форму обкотишів;
  - сирі обкотиші транспортуються конвеєрним транспортом для подальшої обробки.
- 4) сушіння і випалювання:
  - сформовані обкотиші проходять стадії сушіння і випалювання. Випалювання здійснюється при високих температурах (1200–1350°C) у спеціальних печах, що надає обкотишам міцність і дозволяє їм витримувати механічне навантаження при транспортуванні та у процесах доменного виробництва.
- 5) охолодження:
  - випалені обкотиші охолоджуються в спеціальних установках із застосуванням повітря, що зміцнює структури обкотишів для подальшого транспортування.
- 6) контроль якості:
  - перевірка фізико-механічних властивостей (міцність, пористість) і хімічного складу (вміст заліза, домішок), для забезпечення відповідності обкотишів стандартам та вимогам замовника.
- 7) транспортування та зберігання:
  - готові обкотиші зберігаються в бункерах або на спеціальних майданчиках в штабелях.

- продукція транспортується залізничним або морським транспортом до металургійних підприємств.

Преваги залізорудних обкотишів:

- високий вміст заліза (60–70 %), що сприяє підвищенню продуктивності доменних печей;
- однорідність розмірів, що забезпечує рівномірне плавлення в доменних печах;
- міцність - стійкість до механічних впливів під час транспортування;
- екологічність - мінімізація пилу порівняно з використанням дрібнодисперсного концентрату.

Виробництво залізорудних обкотишів є ключовим процесом для забезпечення металургійних підприємств якісною сировиною, що сприяє підвищенню ефективності виробництва сталі та зниженню витрат [3].

### 1.1.1 Відділення приймання та складування компонентів шихти

Технологічна схема відділення представлена на рисунку 1.1.

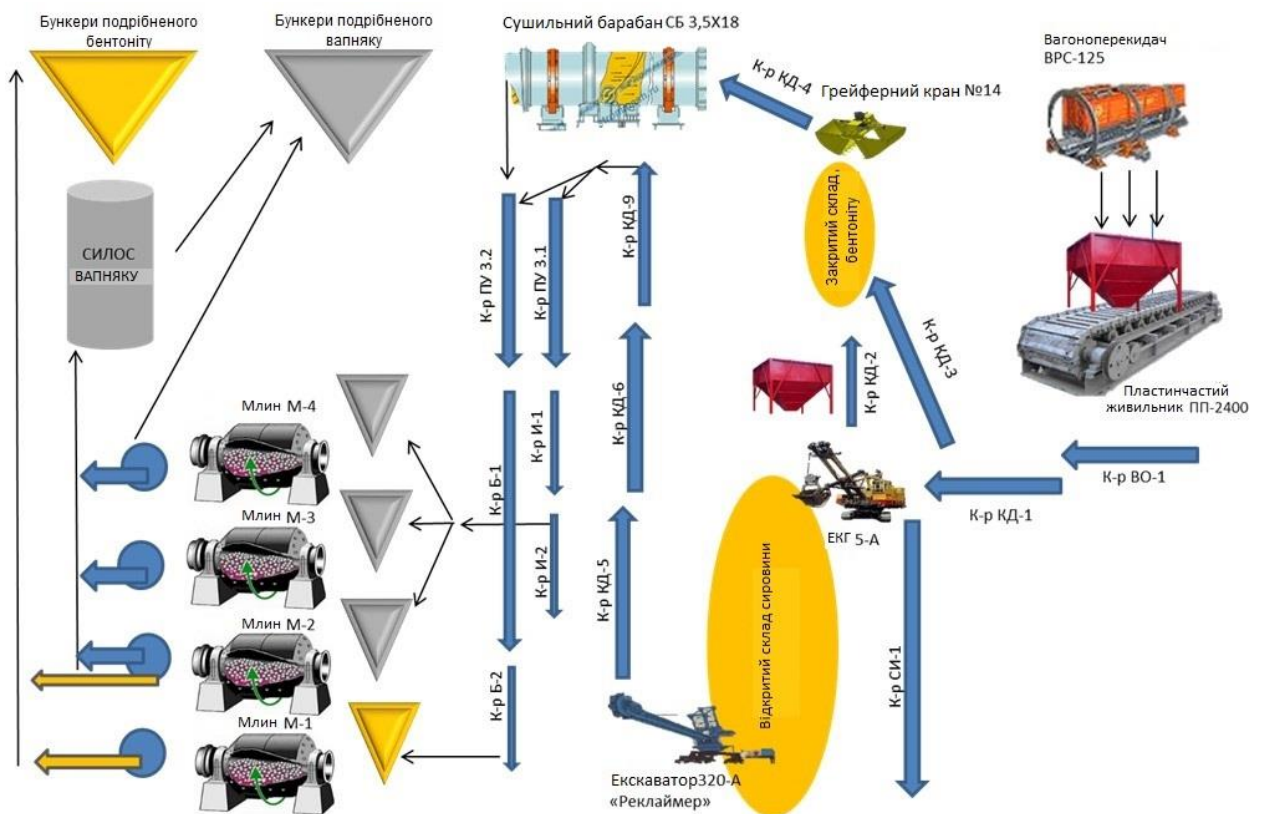



Рисунок 1.1 – Технологічна схема відділення приймання та складування компонентів шихти

Відділення призначене для приймання з залізничних вагонів вапняку і бентоніту, складування матеріалу в штабелі та транспортування його на технологічні дільниці. Матеріал за допомогою роторного вагоноперекидача ВРС–125, продуктивністю до 3125 т/годину, через бункери ємністю



380 м<sup>3</sup>, пластинчастим живильником ПП-2400 транспортується конвеєром КД-1 в корпус подрібнення вапняку та бентоніту.

Вапняк за допомогою штабелеформуючої машини формується в штабель об'ємом 42200м<sup>3</sup>, бентоніт перевантажується в штабель об'ємом 2620м<sup>3</sup>.

Відвантаження вапняку та бентоніту з відкритого складу виконується роторним екскаватором, який переміщується вздовж складу.

З закритого складу подрібнений бентоніт грейферним краном подається в бункер з якого конвеєром КД-4 подається у загрузку сушильного барабана СБ 3,8x18 і сушиться до вологості 10-12 % [6].

### **1.1.2 Відділення подрібнення бентоніту, вапняку та продукту повертання**

Технологічна схема відділення представлена на рисунку 1.2.

Відділення призначене для подрібнення вапняку та бентоніту які транспортуються конвеєрним транспортом з корпусу дроблення вапняку і бентоніту та завантажуються в чотири бункери млинових трактів М1, М2, М3, М4. Подрібнення виконується кульковими млинами Ш-50А. Одночасно виконується процес сушіння матеріалів за допомогою топкових газових агрегатів, встановлених на кожному тракті.

Транспортування подрібненого матеріалу з витратних млинових бункерів здійснюється системами пневмотранспорту [6].

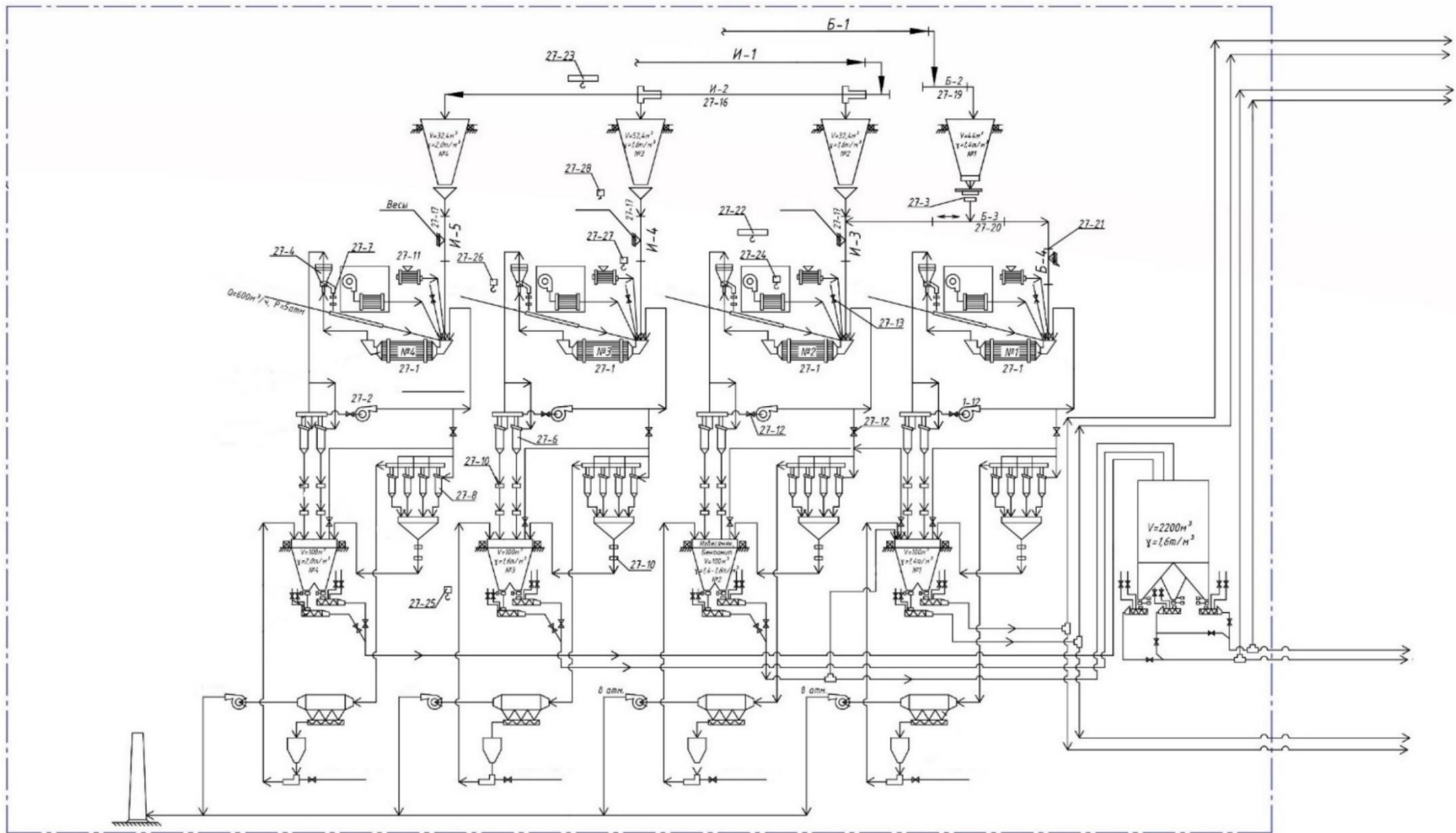


Рисунок 1.2 – Технологічна схема відділення подрібнення бентоніту, вапняку та продукту повертання

### 1.1.3 Відділення дозування компонентів шихти

Технологічна схема відділення представлена на рисунку 1.3.

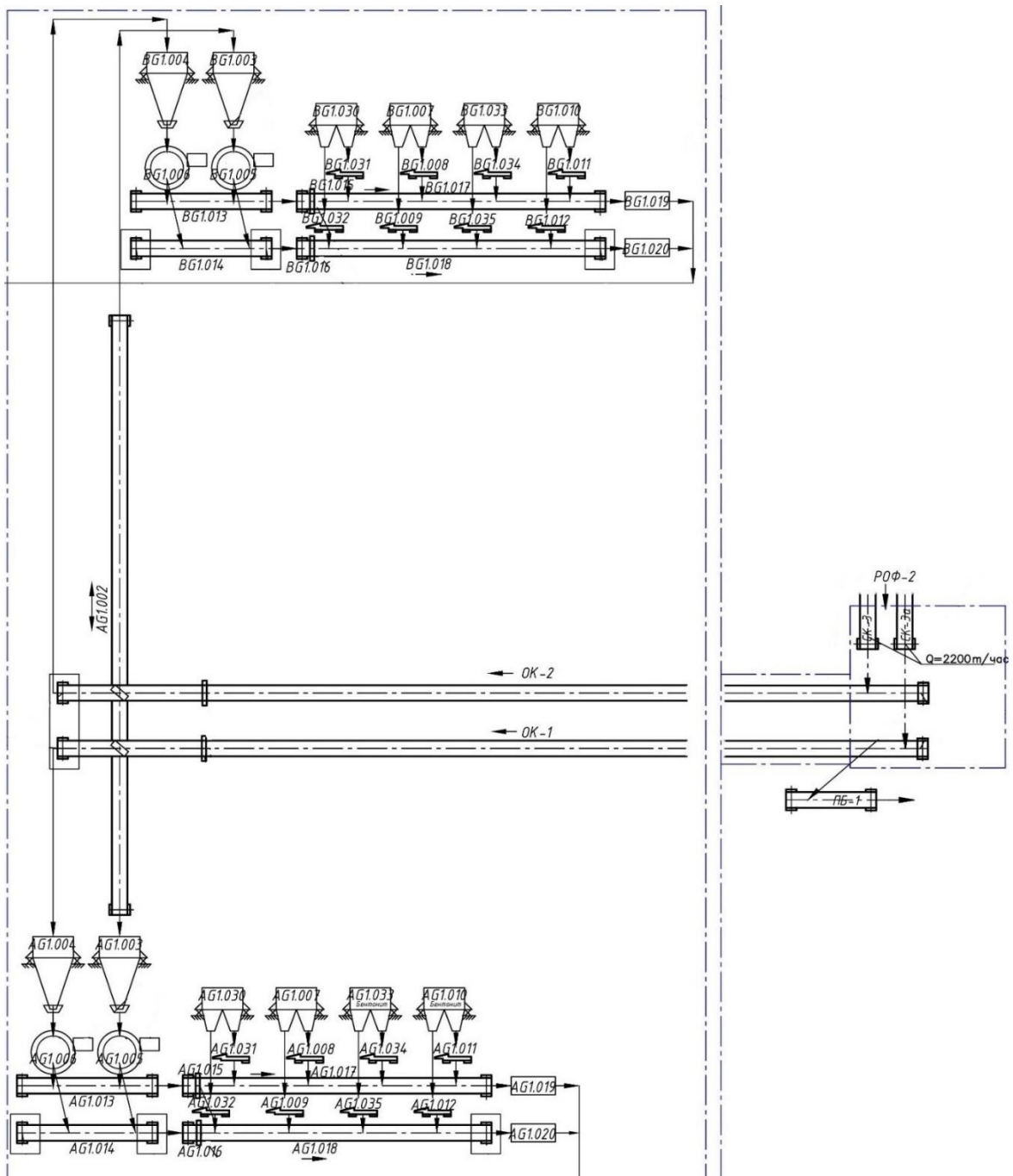


Рисунок 1.3 - Технологічна схема відділення дозування компонентів ШИХТИ

Відділення призначене для точного дозування та ефективного змішування компонентів шихти. Концентрат з бункерів подається на конвеєри за допомогою дискових живильників. Конвеєри оснащені вагами, для забезпечення точного дозування концентрату. Вдоль конвеєрів знаходяться бункери вапняку, бентоніту та подрібненого продукту повертання,

з яких за допомогою стрічкових живильників компоненти шихти додаються до концентрату в заданому співвідношенні системою автоматичного дозування. З конвеєрів шихта завантажується в барабанні змішувачі, де відбувається ретельне перемішування всіх компонентів. Шихта з відділення дозування конвеєрним транспортом завантажується в сім шихтових бункерів об'ємом 45м<sup>3</sup> кожен [6].

### 1.1.4 Відділення огрудкування

Технологічна схема відділення огрудкування представлена на рисунку 1.4.

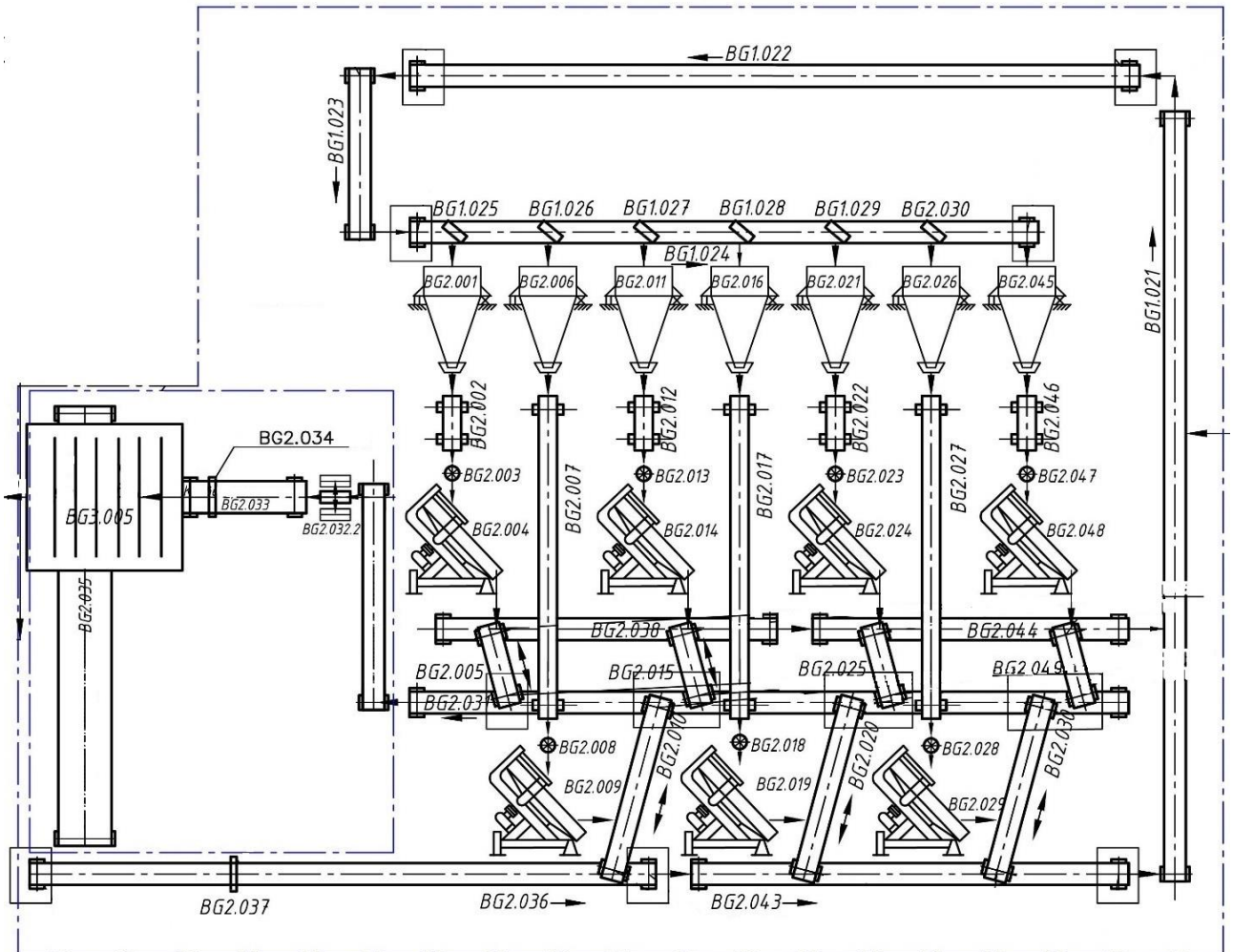


Рисунок 1.4 - Технологічна схема відділення огрудкування

Відділення призначене для виробництва сирих обкотишів, класифікацією їх за розміром та завантаження рівномірним шаром на спікальні візки випалювальної машини для подальшого процесу випалу.

Сирі обкотиші виготовляються за допомогою семи чашових огрудковувачів, номінальною продуктивністю 91 т/год, на які, за допомогою стрічкових дозаторів, з бункерів завантажується шихта, з якої під час обертання чаші формуються обкотиші шароподібної форми.

Далі обкотиші збірним конвеєром транспортуються на човниковий укладальник, який рівномірно розподіляє їх по конвеєру завширшки 4 м., який в свою чергу завантажує двох дечний роликовий грохот-укладальник. Роликовий грохот відсіює обкотиші розміром - 9 мм. та + 16 мм. Та повертає їх конвеєрами в бункери шихти чашових огрудковувачів. Придатний обкотиш завантажується на випалювальну машину [6].

### 1.1.5 Машина для випалу обкотишів

Схематично машина зображена на рисунку 1.5.

Випалювальна машина працює за принципом безперервного конвеєра, що складається з 208 візків. Загальна площа обробки становить 552 м<sup>2</sup>. На цій площі, розділеній на спеціалізовані зони, відбуваються складні фізико-хімічні процеси під впливом точно контрольованих температурних режимів та газового середовища.

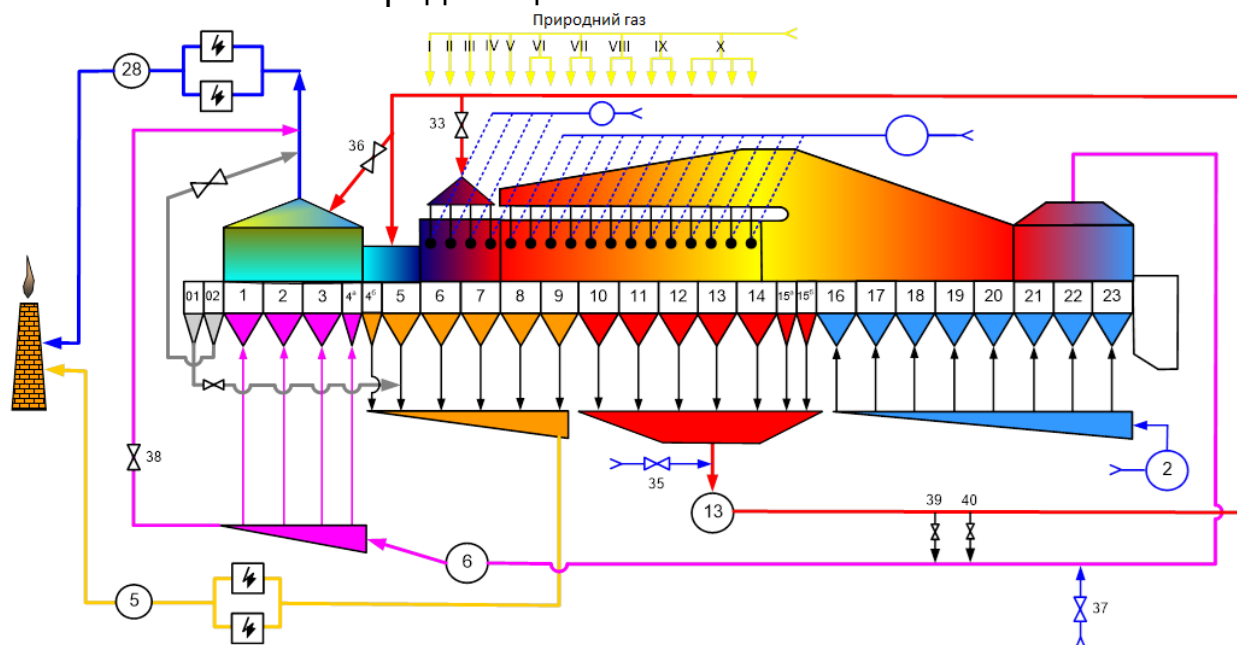


Рисунок 1.5 – Схема газових потоків машини для випалу обкотишів

Сирі обкотиші на випалювальній машині піддаються термообробці, що складається з кількох етапів: сушіння, нагрівання до високих температур, випал та охолодження. Згідно схеми газових потоків (рис. 1.5), внутрішній робочий простір випалювальної машини поділено на такі технологічні зони:

- зона сушіння (розташована над повітряними камерами № 1-4а, 4б-5), призначена для видалення вологи з сирих обкотишів та їх нагрів. Для того щоб, не допустити перезволоження нижніх шарів обкотишів та їх руйнування, сушіння обкотишів виконується в два етапи: сушіння з продувом теплоносія та сушіння з прососом теплоносія;

- зона нагріву сушіння (розташована над повітряними камерами № 6-10), служить для плавного нагріву обкотишів від температури сушіння

до температур випалу. Плавний нагрів необхідний для створення умов протікання ряду фізико-хімічних процесів, які повинні передувати високо-температурному випалу;

- зона випалу (розташована над повітряними камерами № 11-14), де відбувається спікання рудних зерен, плавлення силікатів нерудної частини концентратів, феритів кальцію, залучення в розплав кварцу та інтенсифікація розплавом спікання рудних зерен (жидкофазне спікання);

- зона рекуперації (розташована над повітряними камерами 14 (частково) та 15), це продовження зони випалу. У ній відбувається випал нижньої частини шару обкотишів за рахунок рекуперації тепла з верхньої, вже випаленої частини шару. Випал обкотишів в цих зонах відбувається за рахунок спалювання природного газу в 7 парах пальників. Над зоною рекуперації газ не спалюється, так як тепло в нижні шари обкотишів надходить з гарячим повітрям зони охолодження I, в якій він додатково нагрівається верхніми шарами гарячих, вже випалених обкотишів;

- зона охолодження служить для охолодження випалених обкотишів атмосферним повітрям і повторного використання їх тепла. Зона охолодження розподілена на дві підзони (I та II), які розташовані над повітряними камерами 16-20 і 21-23 відповідно. Температура обкотишів на виході з випалювальної машини не повинна перевищувати 160°C.

В результаті спікання рудних зерен і формування шлакової зв'язки відбувається ущільнення обкотиша та його усадка. В результаті перерахованих вище прикладів при термообробці обкотиші набувають необхідних металургійних властивостей [4,6].

### 1.1.6 Відділення класифікації, складування та відвантаження готової продукції

Технологічна схема відділення представлена на рисунку 1.6.

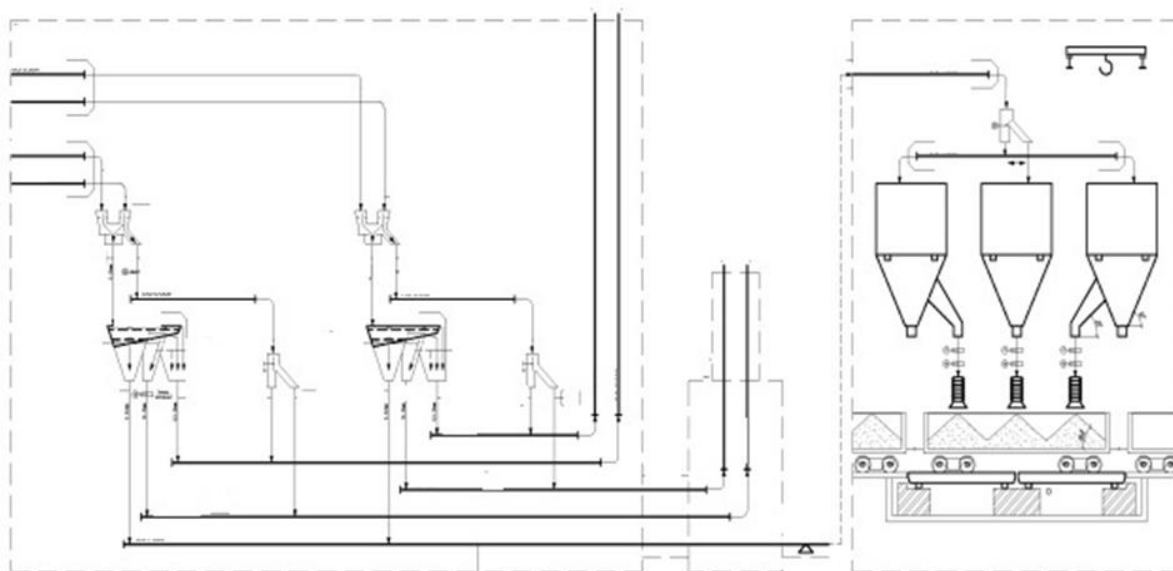



Рисунок 1.6 - Технологічна схема відділення класифікації, складування та відвантаження готової продукції



Відділення призначене для розділення обпалених обкотишів на класи за розміром та транспортування його на склад готової продукції чи у бункери для відвантаження у вагони залізничним транспортом.

На дільниці змонтовано два дводечних трьохпродуктових вібраційних грохоти за допомогою яких відбувається розподілення обкотишів по класам крупності на три потоки: обкотиші готового класу (10–16 мм.), обкотиші для постілі та бокового захисту випалювальних візків (+6,3–25 мм.), та дріб'язок обкотишів (0–6,3 мм.).


Обкотиші для постілі конвеєрним транспортом транспортуються в бункер для донної та бортової постілі, розташований в головній частині випалювальної машини.

Дріб'язок транспортується до дільниці подрібнення вапняку, бентоніту та продукту повертання і після подрібнення в кулькових млинах пневматичним транспортом завантажуються в бункери дільниці дозування компонентів шихти [6].

## **1.2 Вплив різних факторів на роботу випалювальної машини**

Сирі обкотиші повинні бути вкладені рівномірним шаром, як по ширині, так і по довжині випалювальної машини. Нерівномірність завантаження обкотишів по висоті шару призводить до нерівномірного газодинамічного опору. В місцях з низьким шаром опір нижче і туди надходить підвищена кількість теплоносія, а в місцях з високим шаром, навпаки, теплоносій надходить в меншій кількості. Це призводить до нерівномірної теплової обробки обкотишів та зниженню їх якості. При змінному навантаженні сирих обкотишів, постійна висота шару підтримується за рахунок змінення швидкості руху випалювальних візків. При коливанні навантаження понад 10%, зміна швидкості руху візків призводить до неконтрольованого процесу зміни умов випалювання обкотишів. При недовантаженні, процес випалювання закінчується раніше та може статися перегрів візків, а у разі перевантаження, не закінчиться випалювання нижніх шарів обкотишів, що значно знизить їх якість. Ознакою перегріву візків є збільшення температури газів, що відходять в вакуум-камерах вище передбаченого затвердженою технологічною картою.

Температурно-тепловий режим роботи випалювальної машини дозволяє видалити з обкотишів певну кількість вологи. Збільшення вологи обкотишів потребує видалення додаткової кількості води, з чим зона сушки по площі не може впоратися. Недосушені обкотиші надходять в наступні високотемпературні зони, де під дією високої температури газів руйнуються. Це різко знижує газопроникність шару, а відповідно, погіршується теплова обробка обкотишів і знижується їх якість. При збільшенні вологи обкотишів необхідно знизити швидкість руху випалювальної машини, щоб збільшити час знаходження обкотишів в технологічних зонах. При цьому необхідно здійснювати суворий контроль за температурою газів, що відходять в зонах підігріву, випалу та рекуперації, щоб уникнути



перегріву візків. При необхідності потрібно знизити витрату газу на пальники або перевести частину пальників в режим низької витрати палива.

Ознаки збільшення вологості обкотишів, що надходять на машину:

- злипання обкотишів в грони;
- наявність великої кількості некондиційних обкотишів (великих та дрібних);
- втрата шароподібної форми;
- руйнування обкотишів з "вибухом" в зоні нагріву;
- збільшення розрідження або тиску в повітряних камерах зон сушки, нагріву та випалу;
- зниження кількості просмоктуємого теплоносія в зонах;
- зниження температури газів, що відходять.

Неоднорідність сирих обкотишів по крупності викликає погіршення газопроникності шару, неоднакове їх сушіння, прогрів та випал, що призводить до зниження якості. Крупні обкотиші не встигають висохнути в зоні сушки та руйнуються в наступних зонах, а дрібні обкотиші «закупорюють» шар, тобто зменшують його газопроникність [4,6].

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Конструкція випалювального візка

Цех з виробництва обкотишів №2 оснащений двома конвеєрними випалювальними машинами «А» і «В» фірми «LURGI» з площею спікання по 552 м<sup>2</sup>, введеними в експлуатацію в 1979 та 1980 році відповідно, на проектну продуктивність 8,0 млн. тон обкотишів на рік.


Усі випалювальні машини комбінату обладнані автоматизованою системою керування технологічним процесом. Автоматизована система управління технологічним процесом дозволяє здійснювати контроль технологічних параметрів процесу випалу обкотишів та роботи основного обладнання.

Продукція фабрик огрудкування відправляється на металургійні заводи для виробництва чавуну з подальшою переробкою та одержанням сталі та металопрокату різного сортаменту, та користується попитом як на внутрішньому ринку України так і за кордоном.

Слід відзначити, що випалювальний візок (рисунок 2.1) виступає як ключовий елемент в складі випалювальної машини. Представляє собою конструкцію із звареної або литої структури, обладнаний роликami, бортами і колосниковим полем. Вона монтується на рейки випалювальної машини, утворюючи безперервне колосникове поле машини, що рухається за принципом конвеєра [5,6].



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд випалювального візка



Сталева рама випалювального візка складається з декількох секцій, які з'єднані болтами. Між балками рами встановлюються ряди сталевих колосників зі зазорами між ними приблизно 5-6 мм. Зверху до рами прикріплюються змінні борти за допомогою болтів, і їх висота відповідає висоті шару матеріалу, який піддається спікальній обробці. Знизу до рами кріпляться пластини ущільнення, які взаємодіють з пластинами ущільнення вакуум-камер під час руху випалювального візка по випалювальній машині. Рухається вона по колії на чотирьох ходових роликах; захоплення візка здійснюється зірочками приводу за чотири вантажні ролики.


На випалювальній машині змонтовано 208 випалювальних візків. Під час експлуатації машини найчастіше виникають проблеми, такі як перекося візків та застрягання ходових роликів, особливо на закругленнях шляху в задній частині машини. Це спричиняється непаралельності металоконструкцій бічних стінок каркасу машини, нерівномірному розподілу матеріалів у хвостовій частині та перешкодами на шляху руху, такими як просип.

## **2.2 Матеріал для виготовлення випалювальних візків**

Випалювальні візки працюють в надзвичайно суворих умовах: високі температури, агресивне середовище, постійні механічні навантаження. Тому вибір матеріалу для їх виготовлення є одним з найважливіших факторів, що впливають на надійність і довговічність обладнання.

Фактори, які впливають на вибір матеріалу:

- температура робочого середовища. Чим вища температура, тим вищі вимоги до жаростійкості матеріалу;
  - агресивність середовища. Наявність агресивних компонентів в середовищі вимагає використання матеріалів з високою корозійною стійкістю;
  - механічні навантаження. Великі навантаження вимагають використання матеріалів з високою міцністю;
  - економічні фактори. Вартість матеріалу, технологічність обробки.
- Вимоги до матеріалів для виготовлення випалювальних візків:
- жаростійкість. Матеріал повинен витримувати високі температури без втрати міцності та деформації;
  - корозійна стійкість. Здатність протистояти агресивним середовищам, таким як шлаки, газ, пил;
  - міцність. Матеріал повинен витримувати значні механічні навантаження під час експлуатації;
  - зносостійкість. Опір абразивному зношуванню;
  - термостійкість. Здатність витримувати різкі перепади температур;
  - технологічність. Матеріал повинен легко оброблятися і зварюватися.



Матеріали, які використовують для виготовлення випалювальних візків:

- леговані сталі. Завдяки легуванню досягається необхідна жаростійкість, корозійна стійкість і міцність. Найчастіше використовують сталі з додаванням хрому, нікелю, молібдену;

- чавуни. Мають високу жаростійкість і зносостійкість, але меншу міцність порівняно зі сталлю. Застосовуються для виготовлення окремих деталей візків;

- жаростійкі сплави на основі нікелю. Відрізняються високою жаростійкістю і корозійною стійкістю, але мають високу вартість. Використовуються для виготовлення критичних деталей.

В останній час спостерігається тенденція до виготовлення основних компонентів випалювальних візків, таких, як корпус, боковини, з чавуну з шароподібним графітом.

Чавун з шароподібним графітом – це матеріал, який все частіше використовується для виготовлення агломераційних візків. Його унікальні властивості роблять його привабливим вибором для таких складних умов експлуатації.

Перелік переваг чавун з шароподібним графітом:

- висока міцність. Шароподібний графіт рівномірно розподілений по матриці чавуну, що забезпечує високу міцність і в'язкість матеріалу;

- зносостійкість - чавун з шароподібним графітом має високу стійкість до абразивного зношування, що дозволяє йому довше зберігати геометричні розміри і працювати ефективно;

- жаростійкість - матеріал здатний витримувати високі температури без втрати міцності та деформації;

- корозійна стійкість - чавун з шароподібним графітом має досить високу стійкість до корозії в агресивних середовищах;

- демпфування вібрацій - наявність графітових включень сприяє зменшенню рівня вібрацій, що позитивно впливає на загальну надійність конструкції;

- хороші ливарні властивості - матеріал легко піддається литтю, що дозволяє виготовляти деталі складної форми.

Переваги експлуатації візків з чавуну з шароподібним графітом:


- подовження терміну служби. Завдяки своїм властивостям, візки з такого чавуну служать значно довше, ніж виготовлені з інших матеріалів;

- зменшення витрат на ремонт - менша кількість поломок і необхідність у більш рідкісному ремонті;

- поліпшення якості продукції - стабільна робота візків позитивно впливає на якість обкотишів;

- збільшення продуктивності - менші прості обладнання завдяки підвищеній надійності.

Використання чавуну з шароподібним графітом для виготовлення агломераційних візків є ефективним рішенням, яке дозволяє підвищити



надійність і довговічність обладнання, знизити витрати на ремонт і підвищити загальну ефективність виробництва.

## **2.3 Прогин випалювального візка**

Одним із факторів, що впливають на аварійні зупинки випалювальної машини є неприпустимий прогин середньої частини випалювальних візків. Рама спікального візка працює в умовах температур, що циклічно змінюються при силових навантаженнях, що виникають як від впливу шихтової маси (обкотишів), так і в результаті нерівномірного циклічного нагріву по висоті балок. Внаслідок цього, з часом виникає неприпустиме, за умовами роботи, прогинання (короблення) несучих балок рами, а іноді й руйнування її в процесі експлуатації, що може призвести до великих матеріальних втрат.

Так згідно вимог креслень LURGI, максимальний припустимий прогин складає 22 мм. Після досягнення цих значень необхідно демонтувати візок та провести ремонтні дії (демонтаж боковин, перегортання середньої частини на 180 градусів, ревізія підшипникових вузлів ходових та вантажних роликів, ревізія падаючих ущільнень та збірка візка).

Якщо своєчасно не виконувати заміну візка і продовжувати його експлуатацію з неприпустимим прогином, це призводить до зміщення осей ходових колес відносно рельс ходової частини машини (реборди ходових колес візка затискаються між рейками), виникають додаткові осьові навантаження на підшипники, йде інтенсивний знос реборд ходових колес та рейок. Можливе навіть сходження візка з рейкового шляху. Також виникає зміщення осей вантажних роликів відносно осей приводної та холостої зірочок, що призводить до нерівномірного навантаження на підшипники вантажних роликів та передчасний їх вихід з ладу. Також при великих значеннях прогину, виникає ризик пошкодження пелюсткових міжкамерних ущільнень і відповідно аварійних зупинок випалювальної машини.

Оскільки зупинка випалювальної машини знижує її продуктивність, а випалювальний візок є невід'ємною її частиною, яка безпосередньо впливає на технологічний процес, з метою економії палива та електроенергії я вважаю, що для якісного контролю технічного стану випалювальних візків необхідно модернізувати існуючу систему діагностики.

## **2.4 Моніторинг прогину візків: детальний аналіз**

### **2.4.1 Розуміння проблеми**

Прогин випалювальних візків на металургійних підприємствах є серйозним питанням, яке безпосередньо впливає на ефективність виробництва, безпеку праці та довговічність обладнання. Випалювальні візки піддаються значним температурним навантаженням, вібраціям та механічним впливам, що може призводити до деформації та втрати міцності.



Фактори, на які впливає моніторинг прогину візків:

- безпека. Надмірний прогин може призвести до нестабільності візків, збільшуючи ризик аварій та травм персоналу;
- якість продукції. Деформація візків може вплинути на якість випалюваних матеріалів, що призведе до браку та додаткових витрат;
- продуктивність. Часті поломки та простой обладнання через деформацію візків знижують загальну продуктивність підприємства;
- планування технічного обслуговування. Регулярний моніторинг дозволяє своєчасно виявляти проблеми та планувати ремонтні роботи, уникаючи непередбачених простоїв.

#### **2.4.2 Методи моніторингу**

Існує декілька методів моніторингу прогину випалювальних візків:

1) візуальний огляд - найпростіший, але водночас найменш точний метод (дозволяє виявити лише значні деформації).

2) за допомогою вимірювальних приладів:

- лінійки, штангенциркуля (використовуються для вимірювання лінійних розмірів та порівняння їх з номінальними значеннями);
- індикатори переміщення (дозволяють вимірювати малі переміщення та деформації з високою точністю);
- лазери (використовуються для створення 3D-моделей візків та аналізу їх геометрії).

3) системи автоматичного моніторингу:

- тензометричні датчики (вимірюють деформації матеріалу візка під навантаженням);
- вібродатчики (фіксують вібрації, які можуть свідчити про появу дефектів);
- системи комп'ютерного зору (за допомогою камер здійснюють постійний моніторинг геометрії візків);


Переваги автоматичного моніторингу:

- безперервність (постійний контроль стану візків);
- точність (висока точність вимірювань);
- віддалений доступ (можливість моніторингу стану обладнання з будь-якої точки);
- автоматизація (зменшення впливу людського фактора на результати вимірювань);
- прогнозування (можливість прогнозування терміну служби візків та планування ремонтних робіт).

#### **2.5 Розробка системи моніторингу**

Під час розробки системи моніторингу необхідно враховувати такі фактори:

- тип візків. Конструктивні особливості візків впливають на вибір методів вимірювання;

- 
- умови експлуатації. Температура, вологість, вібрації та інші фактори, які впливають на точність вимірювань;
  - вимоги до точності. Вибір обладнання залежить від необхідної точності вимірювань;
  - вартість. Необхідно знайти оптимальне співвідношення між вартістю системи та її функціональністю.

Очікується, що в майбутньому системи моніторингу прогину спікальних візків будуть ставати ще більш точними, надійними та інтегрованими в загальну систему управління виробництвом. Будуть розвиватися такі напрямки:

- використання штучного інтелекту. Для більш точного прогнозування терміну служби візків та оптимізації режимів їх експлуатації;
- інтеграція з іншими системами. Об'єднання систем моніторингу з іншими системами управління виробництвом (SCADA, MES, SAP);
- розширення функціональності. Додавання нових функцій, таких як моніторинг температури, вібрації та інших параметрів.

Моніторинг прогину випалювальних візків є важливим етапом забезпечення безперебійної роботи металургійного підприємства. Застосування сучасних систем автоматичного моніторингу дозволяє підвищити безпеку праці, покращити якість продукції та знизити витрати на ремонт та технічне обслуговування.

## **2.6 Міжнародний досвід моніторингу стану спікальних візків на металургійних підприємствах**

Моніторинг стану спікальних візків є критично важливим аспектом у сучасній металургії. Зарубіжні підприємства активно впроваджують різноманітні системи та технології для забезпечення безперебійної роботи цього обладнання та підвищення загальної ефективності виробництва.

Поширені методи моніторингу за кордоном.

Системи візуального контролю (рис. 2.2):

- використання високоточних камер для фіксації змін геометрії візка, виявлення тріщин, зносу та інших дефектів;
- застосування тепловізійних камер для виявлення перегрітих зон, що можуть свідчити про внутрішні проблеми.



Рисунок 2.2 – Місце оператора для візуального контролю стану візків

**Датчики:**

- датчики вібрації. Фіксують зміни вібраційних характеристик візка, що вказують на несправності підшипників, балансирів та інших механізмів;
- температурні датчики. Контролюють температуру різних вузлів візка для виявлення перегрівів, які можуть призвести до деформацій або відмов;
- датчики деформації. Вимірюють прогини і деформації конструкції візка під навантаженням.

Системи ультразвукової дефектоскопії дозволяють виявляти внутрішні дефекти металу, такі як тріщини та порожнини, без розбирання конструкції.

Роботизовані системи інспекції автоматизують процес огляду візків, забезпечуючи високу точність і швидкість.

Прогнозний аналіз (використання штучного інтелекту для аналізу даних, отриманих з датчиків, з метою прогнозування потенційних відмов та планування профілактичного ремонту).

**Передові технології та їх застосування:**

- цифрові двійники. Створення віртуальної моделі візка, що дозволяє симулювати різні умови експлуатації та прогнозувати його поведінку;
- інтернет речей (IoT). Об'єднання датчиків, пристроїв та програмного забезпечення в єдину мережу для збору та аналізу даних про стан візка в реальному часі;
- доповнена реальність (AR). Використання AR-окулярів для накладання віртуальних інструкцій та даних на реальний об'єкт під час огляду або ремонту.

### 2.6.1 Приклади реалізації

В Німеччині на багатьох металургійних підприємствах широко застосовується автоматизований моніторинг стану спікальних візків за допомогою датчиків та систем комп'ютерного зору (рис. 2.3).

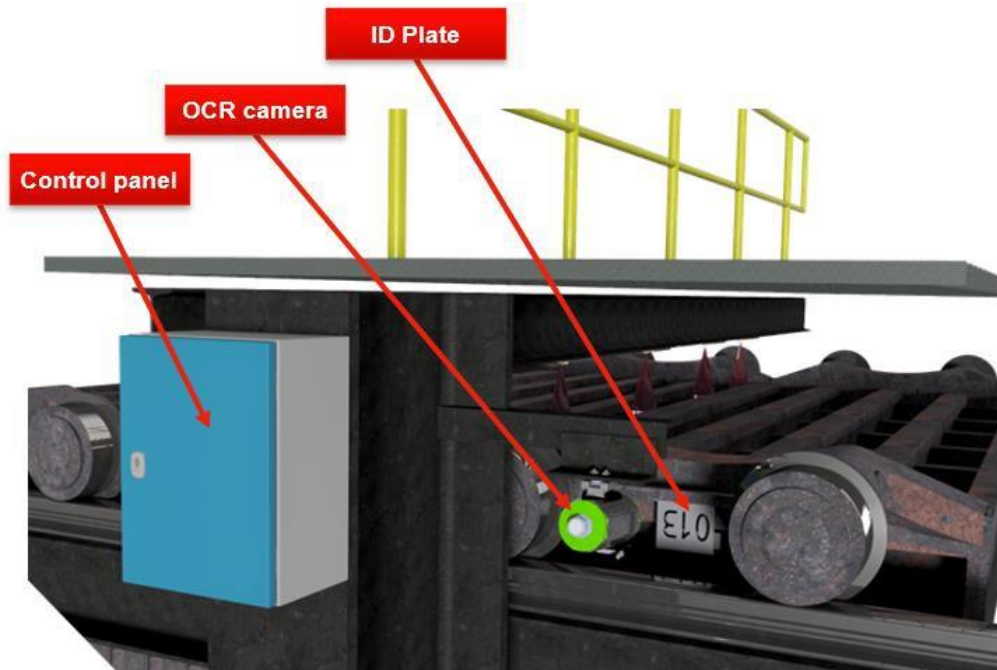


Рисунок 2.3 – Система моніторингу стану візків з застосуванням машинного зору

Японські компанії відомі своїми інноваційними рішеннями в галузі промислової автоматизації. Вони активно впроваджують роботизовані системи інспекції та прогнозний аналіз для підвищення надійності обладнання.

Американські підприємства фокусуються на розробці інтегрованих систем моніторингу, які дозволяють об'єднати дані з різних джерел і отримати комплексну картину стану візка (рис. 2.4).

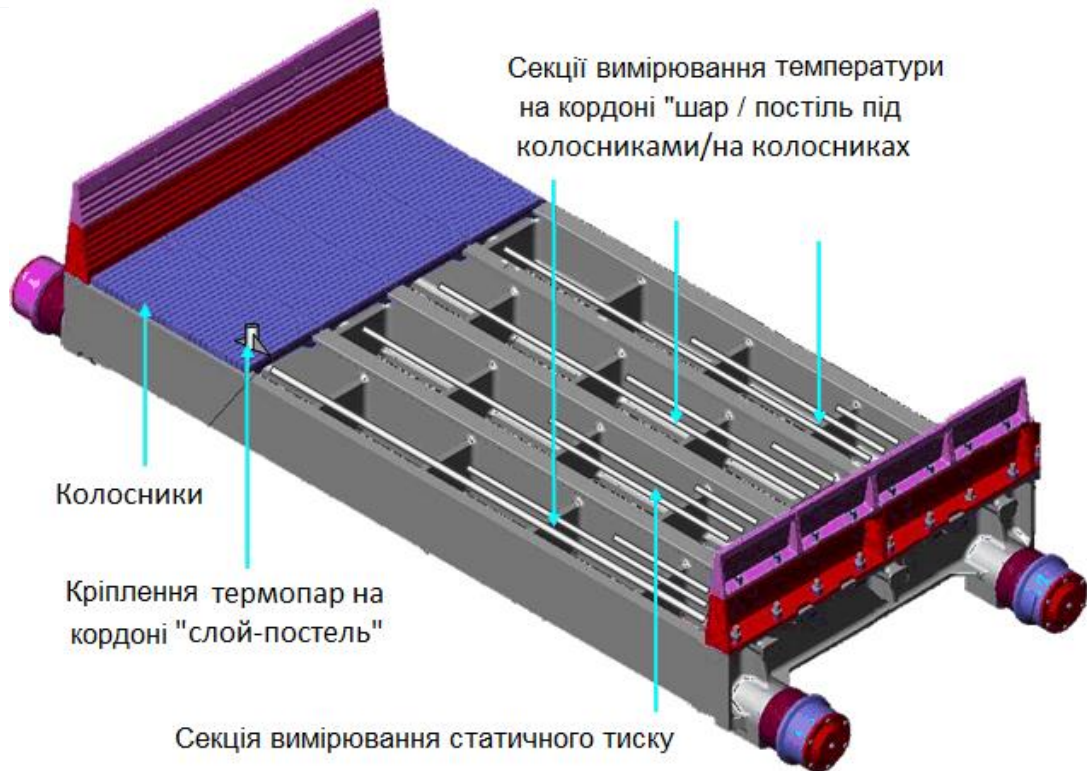


Рисунок 2.4 – Система моніторингу температури та тиску за допомогою датчиків, розташованих на випалювальному візку

Компанія Vale (Бразилія):

- використання тепловізійних камер для моніторингу температурних деформацій візків (рис. 2.5);
- виявлення нерівномірного нагрівання в реальному часі;
- застосування штучного інтелекту для обробки великих обсягів даних.

Результат: зниження витрат на ремонт обладнання на 10%.

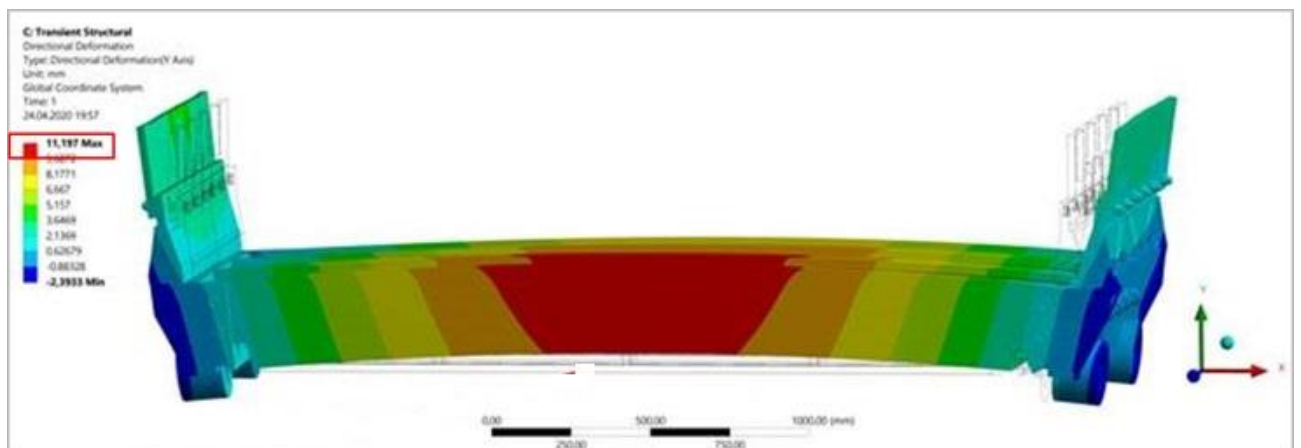



Рисунок 2.5 – Аналіз деформацій візка після обробки сигналів, отриманих від датчиків, спеціалізованою програмою



Полтавський ГЗК (Україна):

- інтеграція ультразвукових та вібраційних датчиків для моніторингу стану візків випалювальної машини LURGI;
- використання системи машинного зору для виявлення поверхневих дефектів (тріщини, корозія);
- автоматичне оповіщення операторів у разі перевищення допустимих параметрів;

Результат: зменшення аварійних зупинок на 20%, підвищення терміну служби візків.

Криворізький гірничо-збагачувальний комбінат (Україна):


- встановлення температурних сенсорів і системи динамічного зважування для контролю рівномірності навантаження на візки;
- реалізація IoT-платформи для збору даних та прогнозування технічного обслуговування.

Результат: оптимізація витрат на технічне обслуговування та підвищення якості продукції (обкотишів).

Переваги міжнародного досвіду:

- висока точність вимірювань. Завдяки використанню сучасних датчиків та алгоритмів обробки даних;
- раннє виявлення дефектів. Можливість виявлення потенційних проблем на ранніх стадіях, що дозволяє уникнути аварійних ситуацій та продовжити термін служби обладнання;
- оптимізація витрат на обслуговування. Завдяки плануванню ремонтних робіт на основі даних моніторингу;
- підвищення безпеки виробництва. За рахунок своєчасного виявлення та усунення потенційних небезпек;
- збільшення продуктивності. За рахунок зменшення простоїв обладнання та підвищення надійності виробничого процесу.

Міжнародний досвід демонструє, що моніторинг стану спікальних візків є ключовим фактором для забезпечення ефективної та безпечної роботи металургійних підприємств. Сучасні технології дозволяють створювати інтелектуальні системи моніторингу, які не тільки фіксують поточний стан обладнання, але й прогнозують його поведінку в майбутньому. Впровадження таких систем дозволяє підвищити загальну ефективність виробництва та знизити витрати на обслуговування.



### **3 ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

#### **3.1 Мета та методи експериментальних досліджень**

Враховуючи жорсткі умови експлуатації конвеєрної колосникової машини, щодо спікальних візків потрібно проводити регламентне технічне обслуговування.

Для своєчасної заміни спікальних візків та запобігання аварійних зупинок обладнання, я пропоную розробити та запровадити автоматизовану систему контролю прогину візків.

Своєчасна заміна візків в значній мірі сприяє збільшенню терміну експлуатації підшипників ходових коліс візків, за рахунок зменшення осьових навантажень, які виникають під час експлуатації візків з прогином вище граничних значень. Що в свою чергу впливає на вартість ремонту візків, та в підсумку знижує собівартість продукції – обкотишів.

Оскільки ідентифікацію та здійснення контролю неполадок спікальних візків планується проводити у безперервному режимі, то можна не тільки отримувати інформацію, які спікальні візки вимагають технічного обслуговування під час виведення в зупинку, а також (визначати), які ремонтні роботи необхідно буде провести для кожного візка ще до того, як буде здійснено зупинку. А також буде час заздалегідь підготувати необхідні інструменти та змінні деталі.

Система повинна включати такі компоненти:

- ідентифікуючий пристрій для однозначної ідентифікації кожного спікального візка;
- сенсорний пристрій для збору параметрів, що характеризують стан візка;
- процесорний пристрій для співвіднесення зібраних параметрів, що характеризують стан з конкретним випалювальним візком;
- запам'ятовуючий пристрій для збереження даних, характеризуючих стан параметрів за кожним випалювальним візком у базі даних;
- оцінювальний пристрій для оцінки стану випалювальних візків конвеєрної випалювальної машини.

Запропонована система (рисунок 3.1) складається з датчиків, які вимірюють відстань між нерухомою горизонтальною балкою, на якій вони закріплені, та середньою частиною візка, який рухається по рейковій колії холостої гілки випалювальної машини.

Для ідентифікації візка застосовується датчик на основі машинного зору, який зчитує інформацію з таблички, закріпленої на боковій частині візка.

Сигнали, отримані від датчиків передаються до електронно-обчислювальної машини, яка виконує ідентифікацію візка, обчислює значення прогину, порівнює його з допустимим та зберігає отриману інформацію.

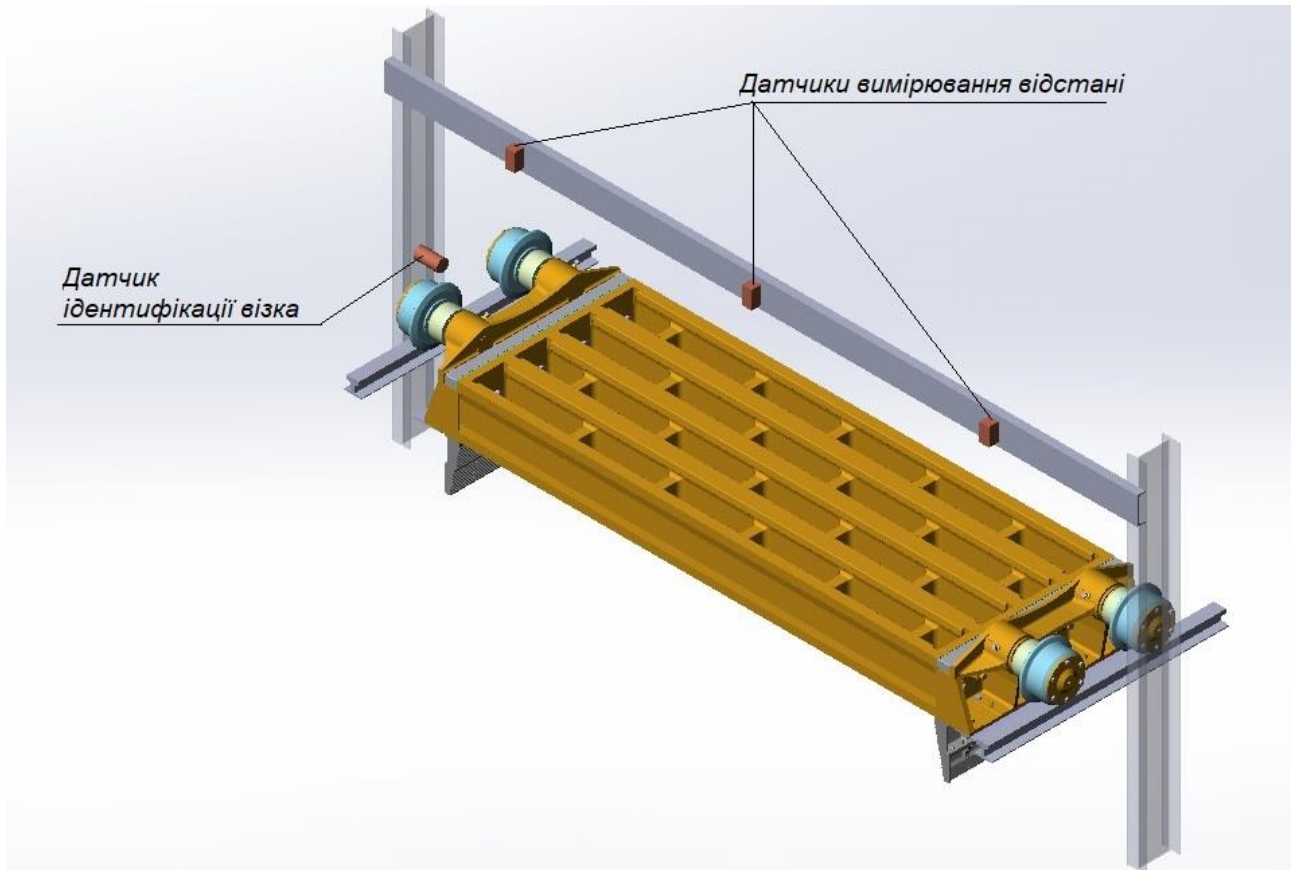


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення запропонованої системи


Якщо прогин наближається до критичного значення або досяг його, оператор отримує сповіщення про необхідність заміни візка.

### 3.2 Перелік використаної апаратури, обладнання

В якості обладнання для проведення експерименту обрано:

1) плату Arduino Uno - це пристрій на основі мікроконтролера ATmega328. До його складу входить все необхідне для роботи з мікроконтролером: 14 цифрових входів/виходів (з них 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для внутрішньосхемного програмування (ICSP) та кнопка скидання. Об'єм флеш-пам'яті ATmega328 становить 32 КБ (з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем). Мікроконтролер також має 2 КБ пам'яті SRAM та 1 КБ EEPROM.

2) ультразвуковий датчик HC-SR04, який використовується для визначення відстані до об'єкта. Він включає п'єзоелектричний ультразвуковий передавач, що випромінює ультразвукові хвилі з частотою 40 кГц, і приймач, що приймає відбиту ультразвукову хвилю. Також HC-SR04 містить внутрішній мікроконтролер та чіпи для посилення та обробки сигналів.



3) програму Arduino IDE, яка є інтегрованим середовищем розробки (IDE), що об'єднує в собі такі інструменти для роботи з платами Arduino:

- текстовий редактор для написання коду, використовуючи спрощену версію мови C++;
- компілятор, який перетворює написаний код на мову, зрозумілу мікроконтролеру Arduino;
- завантажувач, який переносить скомпільований код у пам'ять мікроконтролера;
- монітор послідовного порту, що дозволяє спілкуватися з платою Arduino і відстежувати її роботу [7].

### **3.3 Результати досліджень із аналізом отриманих результатів**

Ідея була перевірена із застосуванням навчальної платформи Arduino Uno, на базі мікроконтролера AtMega328P та набору ультразвукових датчиків.

Для цього система автоматизованого контролю стану візків має включати в своєму складі кілька підсистем:

- підсистема ідентифікації візків;
- підсистема контролю прогину;
- підсистема логування даних;
- підсистема індикації поточного стану;
- підсистема обміну даними.

Відповідно до сформульованого завдання розроблена система контролю прогину візків, блок-схема якої показана на рисунку 3.2.

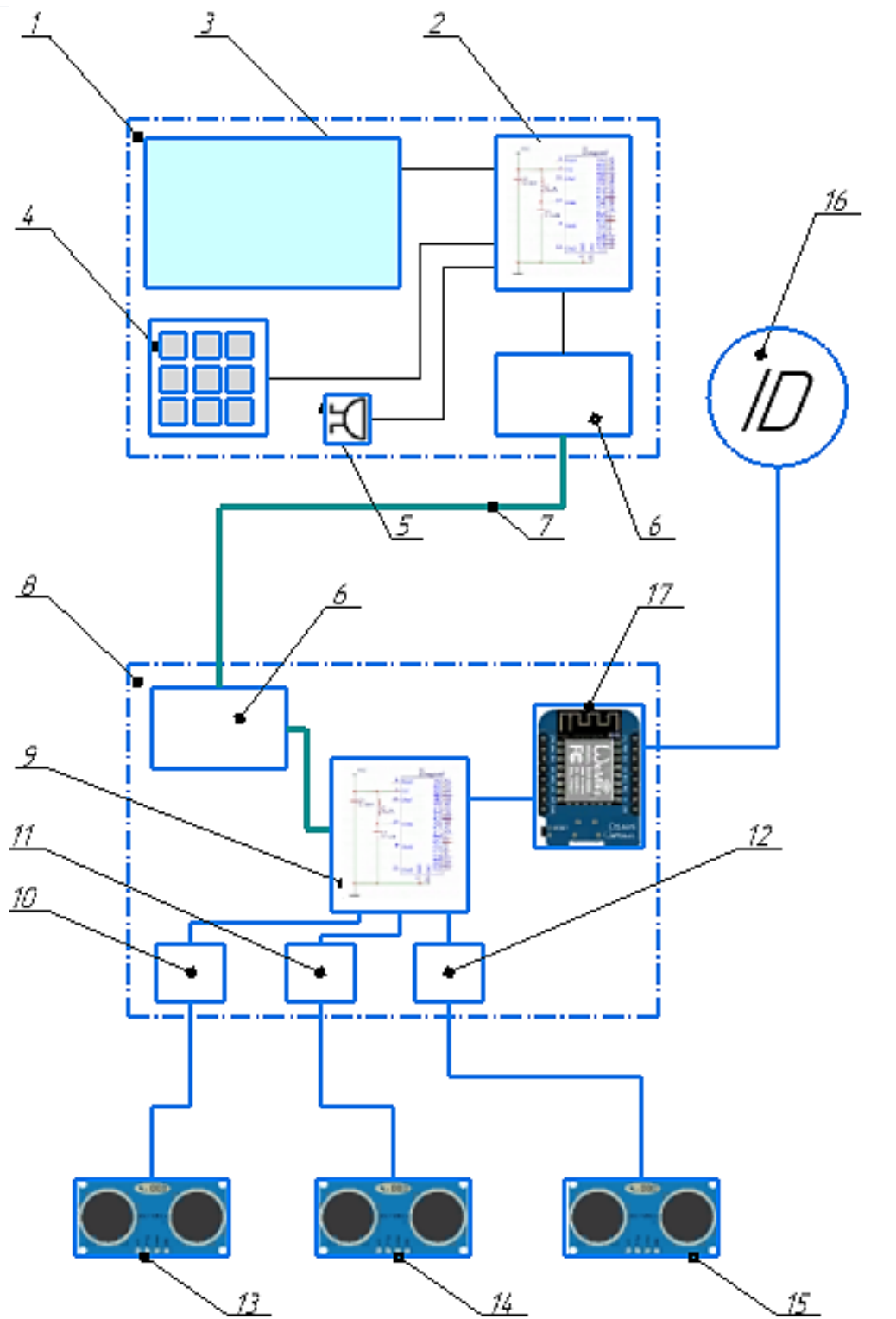


Рисунок 3.2 – Блок-схема системи контролю прогину візків

Система включає в себе два великі вузли: модуль керування та індикації (1), що встановлюється у зручному для оператора місці та модуль вимірювання (8), що встановлюється поблизу контрольної точки обладнання (наприклад, в районі радіусу) так, щоб його ультразвукові датчики висоти (13-15) були направлені до контрольованого візка під прямим кутом.

Обидва модулі побудовані на базі однокристальних мікро ЕОМ (2) (далі мікроконтролера) AtMega328P та плат ESP8266.

Модуль керування та індикації включає в себе також і TFT-дисплей (3), клавіатуру (4) та зумер (5).

Модуль вимірювання (8) сприймає сигнали від ультразвукових датчиків висоти (13-15) марки HC-SR04, і на основі його показів видає сигнал оператору про необхідність заміни візка.

Одночасно сигнали від камери штучного зору (16) обробляються контролером машинного зору (17), який ідентифікує візок. Після чого результати вимірів зберігаються за конкретним візком в пам'яті ЕОМ.

Зв'язок між модулями керування та індикації (1) і модулем вимірювання (8) реалізовано за допомогою модулів інтерфейсу RS-485 (6) по шині RS-485 (7), яка є загальноприйнятим каналом обміну даними в промислових автоматизованих системах.

Характеристики платформи з даним мікроконтролером, яку пропонує використати, наведені в додатку А.

В якості датчика відстані, використаємо ультразвуковий датчик HC-SR04 (рисунок 3.3). Він являє собою досить стабільний та точний датчик відстані, спроектований для роботи з платформами на базі контролерів AtMega328P. Він може вимірювати відстань від 0 см до 150 см, а точність його досягає 3 мм, чого більш ніж достатньо для наших задач.



Рисунок 3.3 – Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04

Характеристики датчика відстані наступні:

- робоча напруга: 3.8 - 5.5В;
- тип: HC-SR04;
- струм: 8 мА;
- частота: 40 кГц;
- максимальна дистанція: 1500 мм;

- мінімальна дистанція: 0 см;
- роздільна здатність: 3 мм;
- ширина імпульсів: 10 мкс;
- кут: 15 градусів;
- зовнішні габарити: 37x20x15 мм.

Датчик підключається до контролера по схемі, наведеній на рисунку

3.4.

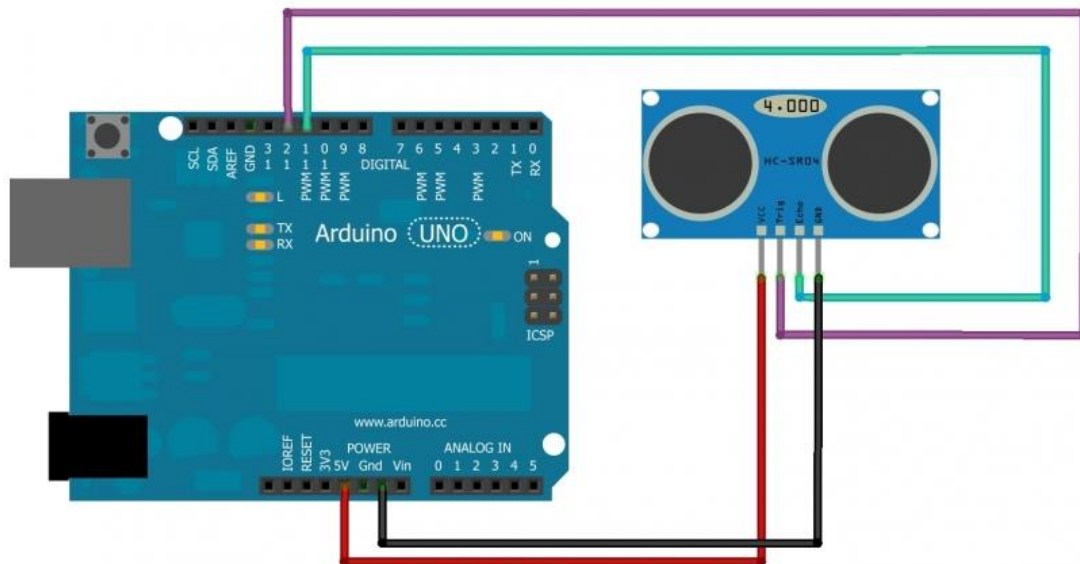


Рисунок 3.4 – Схема підключення ультразвукового датчика відстані HC-SR04

Принцип роботи схеми вимірювання висоти такий. На пін trigger датчика подається один імпульс високого логічного рівня, відразу після чого ультразвуковий випромінювач генерує пакет з 8 імпульсів частотою 30-40 кГц, що відбиваються від перешкоди і фіксуються датчиком, відразу після чого на піні echo появляється логічний імпульс високого рівня.

Знаючи швидкість звуку, можна обчислити і відстань до перешкоди. Графічно принцип роботи показано на діаграмі на рисунку 3.5.

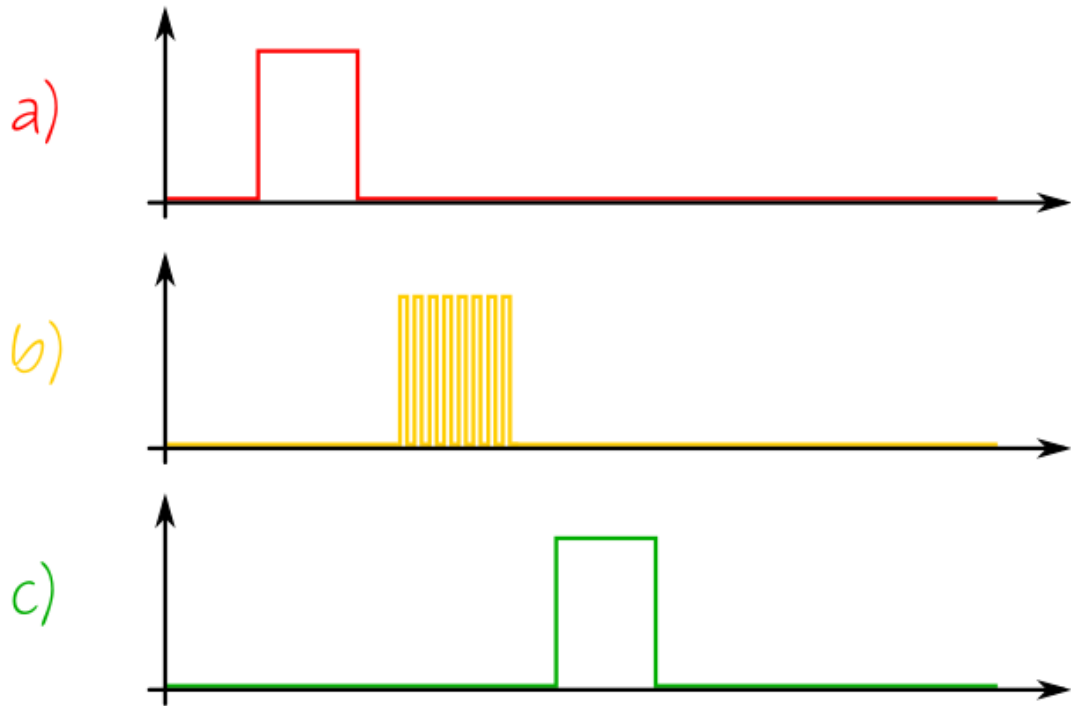


Рисунок 3.5 – Діаграма роботи ультразвукового датчика відстані HC-SR04: а - стартовий сигнал від мікроконтролера на вхід Trigger датчика HC-SR04; б - ультразвук надісланий випромінювачем HC-SR04; с - сигнал на виході Echo датчика HC-SR04

Програмування контролера здійснюється за допомогою середовища Arduino IDE v.2.3.3 через інтерфейс USB та мікросхему інтерфейсу UART на чіпі CH-341. Приклад скетчу для вимірювання висоти наведено в додатку Б.

З метою перевірки працездатності ідеї була зібрана дослідна схема, показана на рисунку 3.6, яка включає платформу Arduino UNO на базі мікроконтролера AtMega328P, датчик відстані HC-SR04 та LCD-дисплей 1602A з інтерфейсом SPI, зібрані на макетній платі. Для роботи схеми написаний скетч в середовищі Arduino IDE v.2.3.3, що наведений в додатку В.

Інтерфейс середовища Arduino IDE із завантаженим та скомпільованим скетчем наведено у додатку Г.

Зібрана схема наведена у додатку Д.

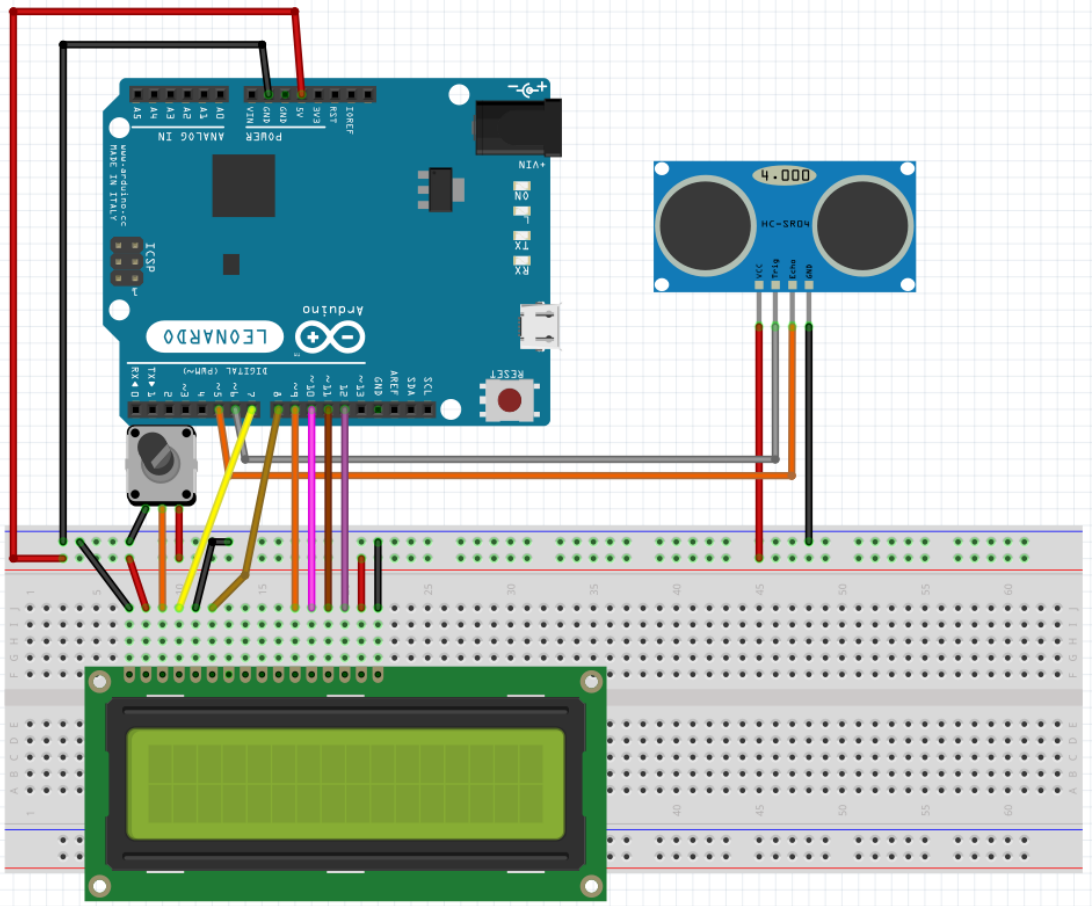


Рисунок 3.6 – Дослідна схема для вимірювання висоти з індикацією на дисплеї 1602A

Працездатність схеми і скетчу перевірена шляхом її реалізації на макетній платі (додаток Е), що доводить правильність вибору шляху для вирішення проблеми.


### 3.4 Вибір компонентів системи

#### 3.4.1 Датчики для вимірювання відстані

Датчики відстані – це електронні пристрої, призначені для безконтактного вимірювання відстані до об'єкта. Вони широко застосовуються в промисловості, робототехніці, автоматизації та інших галузях. Вибір типу датчика залежить від таких факторів, як необхідна точність вимірювання, робочий діапазон, тип поверхні об'єкта та умови навколишнього середовища.

Різновиди датчиків відстані:

- ультразвукові датчики використовують звукові хвилі високої частоти. Датчик випромінює звуковий імпульс, який відбивається від об'єкта і повертається до приймача. За часом проходження імпульсу обчислюється відстань;
- інфрачервоні датчики використовують інфрачервоне випромінювання. Датчик випромінює інфрачервоний промінь, який відбивається від



об'єкта і повертається до приймача. За часом проходження променя або за зміною його інтенсивності обчислюється відстань;

- лазерні датчики використовують лазерне випромінювання. Принцип роботи аналогічний інфрачервоним датчикам, але лазерне випромінювання забезпечує більшу точність і дальність вимірювання;

- радарні датчики використовують радіохвилі. Застосовуються для вимірювання великих відстаней і в умовах високої зашумленості.

Під час вибору датчика відстані необхідно враховувати такі фактори:

- діапазон вимірювання. Від кількох міліметрів до декількох метрів;

- точність вимірювання. Залежить від типу датчика та його конструкції;

- швидкість вимірювання. Частота, з якою датчик може здійснювати вимірювання;

- умови навколишнього середовища (температура, вологість, забруднення, вібрація);

- тип об'єкта. Колір, поверхня, розмір;

- вартість. Ціна датчика залежить від його характеристик і виробника.

Переваги використання датчиків відстані:

- безконтактний вимір. Немає механічного зносу;

- Висока точність. Можливість отримання точних результатів вимірювання;

- швидкість. Висока швидкість вимірювання;

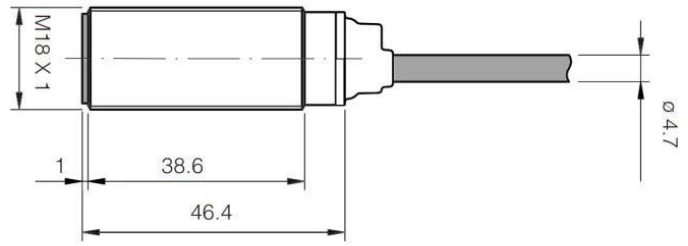
- надійність. Датчики відстані відрізняються високою надійністю і довговічністю;

- широкий діапазон застосувань. Можуть використовуватися в різних галузях.

Датчики відстані є важливим компонентом сучасних автоматизованих систем. Вони дозволяють вирішувати різноманітні завдання, підвищуючи ефективність виробництва та забезпечуючи безпеку. Вибір оптимального датчика залежить від конкретних умов застосування.

В якості датчика відстані пропоную застосувати ультразвуковий датчик Micro Detectors UK6D/H2-1AUL (рисунок 3.7).

Ультразвуковий датчик відстані Micro Detectors UK6D/H2-1AUL виявляє предмети з будь-яких матеріалів і постійно вимірює відстань. Вимірювані значення можуть бути в межах до 1,2 м. Модель з аналоговим вихідним сигналом по струму 4-20 мА. Особлива характеристика - можливість навчання. Датчик має компактний, стійкий до агресивних речовин і зносостійкий різьбовий корпус із нержавіючої сталі. Продумана конструкція захищає від пилу та інших зовнішніх впливів для максимально точної роботи датчика [8].



Технічні параметри	
Розмір корпусу	M18
Форма корпусу	Різьбовий
Підключення	Кабель
Вихід	Аналоговий
Аналоговий вихід	4-20 мА
Матеріал корпусу	Нержавіюча сталь
Робоча відстань, мм	1200

Рисунок 3.7 – Датчик відстані Micro Detectors UK6D/H2-1AUL та його технічні характеристики

### 3.4.2 Датчики для ідентифікації візків

Системи штучного зору – це технології, які дозволяють комп'ютерам "бачити" і розуміти візуальну інформацію так само, як це роблять люди. Важливу роль у цих системах відіграють різноманітні датчики, які здатні перетворювати світлову енергію на електричні сигнали, які потім обробляються комп'ютером.

Основні типи датчиків для систем штучного зору:

- цифрові камери. Найпоширеніший тип датчиків. Перетворюють світло в цифровий сигнал, який може бути оброблений комп'ютером;
- веб-камери. Більш прості за конструкцією, використовуються для відеоконференцій та інших простих завдань;
- промислові камери. Спеціалізовані камери для використання в складних умовах виробництва, здатні працювати в широкому діапазоні освітленості;
- RGB-датчики. Вимірюють інтенсивність червоного, зеленого та синього кольорів, що дозволяє отримати повну кольорну інформацію про зображення;
- спектральні датчики. Вимірюють інтенсивність світла на різних довжинах хвиль, що дозволяє визначати склад матеріалу або його стан;
- структурні світлові датчики. Проектують на об'єкт візерунок і аналізують його деформацію для визначення глибини.

- датчики часу польоту (ToF). Вимірюють час, за який світловий імпульс досягає об'єкта і повертається назад;
- стереокамери. Використовують дві камери для створення тривимірного зображення;
- LiDAR (Light Detection and Ranging). Використовує лазерне сканування для створення детальних 3D-моделей об'єктів;
- теплові камери. Виявляють інфрачервоне випромінювання, що дозволяє "бачити" об'єкти в темряві або через перешкоди. Застосовуються в системах нічного бачення, термографії та інших областях.
- датчики ультрафіолетового випромінювання. Використовуються для виявлення фальшивок, дефектів матеріалів та інших завдань;
- рентгенівські датчики. Застосовуються в промисловій дефектоскопії, медичній діагностиці та інших областях.

Принципи роботи датчиків. Більшість датчиків працюють за принципом перетворення світлової енергії в електричний сигнал. Цей сигнал потім оцифровується і передається на обробку в комп'ютер.

Вибір датчика залежить від конкретного завдання:

- роздільна здатність (чистота зображення);
- чутливість (здатність фіксувати слабкі світлові сигнали);
- швидкість (частота зйомки);
- робочий діапазон (відстань, на якій датчик може працювати);
- умови освітлення (природне, штучне, змінюване);
- вартість (ціна датчика залежить від його характеристик і виробника).

Датчики є основою будь-якої системи штучного зору. Вибір правильного датчика дозволяє створити ефективну систему, яка зможе вирішувати різноманітні завдання.

В якості датчика ідентифікації візків пропоную використати камеру SICK InspectorP63x (рисунок 3.8).

SICK InspectorP63x є програмована і конфігурована камера машинного зору 2D для багатоцільового застосування в промислових завданнях в області обробки зображень, які вимагають великої дальності дії й високої роздільної здатності. Її висока чіткість зображення від 2 до 4 мегапікселів, міцний корпус з захистом IP-65 і гнучкий високоякісний оптичний дизайн забезпечують ідеальне рішення відповідальних завдань в області автоматизації. Завдяки наявності інструментального середовища SICK AppSpace, заснованої на обробці зображень на базі HALCON і бібліотеці алгоритмів SICK, що застосовується програмне забезпечення відрізняється високим ступенем гнучкості [9].



Постановка завдання	Контроль, Інспекція, Вимірювання, Зчитування
Датчик	Датчик з КМОП-матрицею, відтінки сірого
Роздільна здатність датчика	2.048 px x 1.088 px (2,1 Mpixel) 2.048 px x 2.048 px (4,2 Mpixel)
Джерело світла	Білий, синій
Фокус	Регульований фокус / Динамічне управління фокусом
Об'єктив	Змінний (кріплення C-mount), замовляється окремо / інтегрований
Оптичний формат	1"
Призначені для користувача інтерфейси	Веб-сервер
Елементи управління	2 клавіші
Послідовний	✓, RS-232, RS-422
Ethernet	✓, TCP/IP, FTP, HTTP
CAN	✓, Датчики фірми «SICK» на базі локальної мережі контролерів CAN (провідний / ведений)
EtherNet/IP™	✓

Рисунок 3.8 – камера SICK InspectorP63x та її технічні характеристики

#### 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ

Своєчасна заміна візків в сприяє збільшенню терміну експлуатації підшипників ходових коліс візків, за рахунок зменшення осьових навантажень, які виникають під час експлуатації візків з прогином вище граничних значень.

Впровадження запропонованої системи прогнозуємо дозволить зменшити витрати підшипників ходових коліс на 20 %.

Згідно даних, отриманих від ЦВО-2, цех використовує, під час виконання ремонтів візків, підшипники 7520 (32220), в кількості 40 шт. на місяць. Закупівельна вартість 1 підшипника становить 4080,00 грн. Тобто річні витрати становлять 1 958 400 грн.

З впровадженням системи, економія підшипників становитиме 96шт. за рік на суму 391 680 грн.

Для визначення економічного ефекту та строку окупності проекту треба виконати розрахунок капітальних витрат на впровадження запропонованої системи контролю прогину візків.

Капітальні витрати на впровадження системи приведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Капітальні витрати на впровадження системи контролю прогину візків.

Перелік обладнання	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Вартість, грн.
Датчик відстані Micro Detectors UK6D/H2-1AUL	3	10 785	32 247
Система машинного зору з використанням камери SICK InspectorP63x	1 компл.	270 258	270 258
Написання програмного продукту та інтеграція його до існуючої АСУТП	1 компл.	300 000	300 000
Будівельно-монтажні роботи	1 компл.	68 000	68 000
Пуско-налагоджувальні роботи	1 компл.	34 000	34 000
<b>ЗАГАЛОМ</b>		<b>742 322 грн.</b>	

Визначення економічних показників проекту проведено виходячи з припущення, що строк реалізації проекту буде становити 3 роки. [10].

Грошовий потік за 3 роки складе:

$$ГП = E_{гр} \times 3, \quad (4.1)$$

де  $E_{гр}$  – економія в грошовому еквіваленті



$$\text{ГП} = 391\,680 \times 3 = 1\,175\,040 \text{ (грн.)}$$

Інвестиційні кошти складають

$$\text{ІК} = 742\,322 \text{ (грн.)}$$

Розрахунок чистого приведеного доходу ЧПД (NPV) проекту:

$$\text{NPV} = \text{ГП} - \text{ІК} \quad (4.2)$$

$$\text{NPV} = 1\,175\,040 - 742\,322 = 432\,718 \text{ (грн.)}$$

Розрахунок індексу прибутковості (ІР) проекту:

$$\text{ІР} = \text{ГП} \div \text{ІК} \quad (4.3)$$

$$\text{ІР} = 1\,175\,040 \div 742\,322 = 1,58$$

Розрахунок періоду окупності ПО (РР) проекту:

$$\text{РР} = \text{ІК} \div (\text{ГП} \div 3) \quad (4.4)$$

$$\text{РР} = 742\,322 \div (1\,175\,040 \div 3) = 1,89 \text{ (років)}$$

NPV позитивний – це означає, що проєкт є прибутковим і його варто реалізувати.

ІР більше 1 – це підтверджує вигідність проєкту, оскільки вартість майбутніх грошових потоків перевищує початкові інвестиції.

ПО (період окупності) менший за період реалізації проєкту, що свідчить про швидку окупність інвестицій.

Загалом проєкт є ефективним і його варто впроваджувати.



## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглянуто актуальну проблему автоматизації обліку та контролю геометричних параметрів спікальних візків випалювальної машини LURGI 552A (B).

Проведено детальний аналіз предметної галузі, визначено основні фактори, що впливають на прогин рами випалювальних візків, та оцінено сучасні підходи до моніторингу їх стану.

Розроблено та впроваджено концепцію автоматизованої системи моніторингу, яка включає: використання ультразвукових датчиків для точного вимірювання прогину, систему машинного зору для ідентифікації візків, алгоритми обробки та аналізу отриманих даних для попередження аварійних зупинок.

Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили ефективність запропонованої системи в умовах виробництва, її здатність зменшити витрати на технічне обслуговування та підвищити рентабельність.

Обґрунтовано економічну доцільність впровадження системи, що сприяє зниженню собівартості продукції та забезпеченню стабільності виробничих процесів.

Запропоновані технічні рішення дозволяють значно підвищити ефективність експлуатації випалювальної машини, зменшити аварійні зупинки і забезпечити високу якість продукції – обкотишів.

Результати дослідження мають практичне значення для підприємств металургійної галузі, що прагнуть підвищити рівень автоматизації, зменшити операційні витрати та покращити якість своєї продукції.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. М. Р. Руденко, Н. Д. Ванюкова, Є. М. Сігарьов, В. М. Самохвал. Металургія чорних металів: конспект лекцій / за ред. М. Р. Руденко. Кам'янське: ДДТУ 2019. 76 с.
2. Світовий ринок залізорудних обкотишів – тенденції галузі та прогноз до 2029 року. URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-iron-ore-pellets-market> (дата звернення: 10.08.2024).
3. Л. А. Цибулько. Конспект лекцій по дисципліні «Технологія використання корисних копалин». Дніпро, 2006 р. 117 с.
4. М. Р. Руденко. Конспект лекцій з дисципліні «Металургія чорних металів». Кам'янське: ДДТУ, 2019. 76 с.
5. Єфіменко Г.Г., Гімельфарб А.А., Шевченко В.Є. Металургія чавуну, -Київ: Вища школа, 1993, 350 с.
6. Виробництво обкотишів. Випалювальна машина LURGI 552-A, LURGI 552-B. Цех з виробництва обкотишів №2 (ЦВО-2). технологічна інструкція ТІ 277-02-2021. Кривий Ріг: 2021 р. 51 с.
7. Arduino основи програмування URL: [https://geekmatic.in.ua/ua/arduino\\_osnovyi\\_programmirovaniya](https://geekmatic.in.ua/ua/arduino_osnovyi_programmirovaniya) (дата звернення: 15.11.2024).
8. Datasensing, Products, Sensors, Ultrasonic sensors, Cylindrical sensors, UK6, UK6D/H2-1AUL URL: <https://www.datasensing.com/eng/sensors/uk6/uk6d-h2-1aul/UK6D-H2-1AUL-pm-8002.html> (дата звернення: 15.11.2024).
9. SICK Sensor Intelligence, Produits, Vision industrielle et identification, Vision industrielle, InspectorP64x URL: <https://www.sick.com/ch/fr/catalog/produits/vision-industrielle-et-identification/vision-industrielle/inspectorp64x/c/g401752> (дата звернення: 15.11.2024).
10. Рижиков В.С., Яковенко М.М., Латишева О. В., Дегтярьова Ю. В., Щелкова А.Л., Коваленко О.О. Проектний аналіз. Навчальний посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2017 рік – 384 с.



## ДОДАТОК А ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАТФОРМИ ARDUINO UNO

Основні характеристики:

- 1) мікроконтролер: ATmega328P;
- 2) робоча напруга: 5 В;
- 3) живлення:
  - від USB (5 В);
  - від зовнішнього джерела через роз'єм живлення (7–12 В);
- 4) цифрові входи/виходи: 14 (6 з них підтримують ШІМ);
- 5) аналогові входи: 6;
- 6) максимальний струм на один вивід: 20 мА.;
- 7) флеш-пам'ять: 32 КБ (0.5 КБ використовується для завантаження);
- 8) SRAM: 2 КБ;
- 9) EEPROM: 1 КБ;
- 10) тактова частота: 16 МГц.

Інтерфейси підключення:

- 1) USB-порт: Для програмування та живлення;
- 2) роз'єм живлення: Для зовнішнього джерела енергії;
- 3) ICSP: Для програмування через зовнішній програматор;
- 4) UART (послідовний порт): Через пін RX і TX;
- 5) I<sup>2</sup>C: Через піни A4 (SDA) і A5 (SCL);
- 6) SPI: Через виділені піни (10, 11, 12, 13).

Додаткові особливості:

- 1) вбудований світлодіод: Підключений до піну 13;
- 2) розміри: 68,6 мм × 53,4 мм;
- 3) сумісність: Платформа підтримує численні розширення, що розширюють її функціональність;
- 4) програмування: Використовує середовище Arduino IDE на мові, схожій на C/C++.



## ДОДАТОК Б ПРИКЛАД СКЕТЧУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ

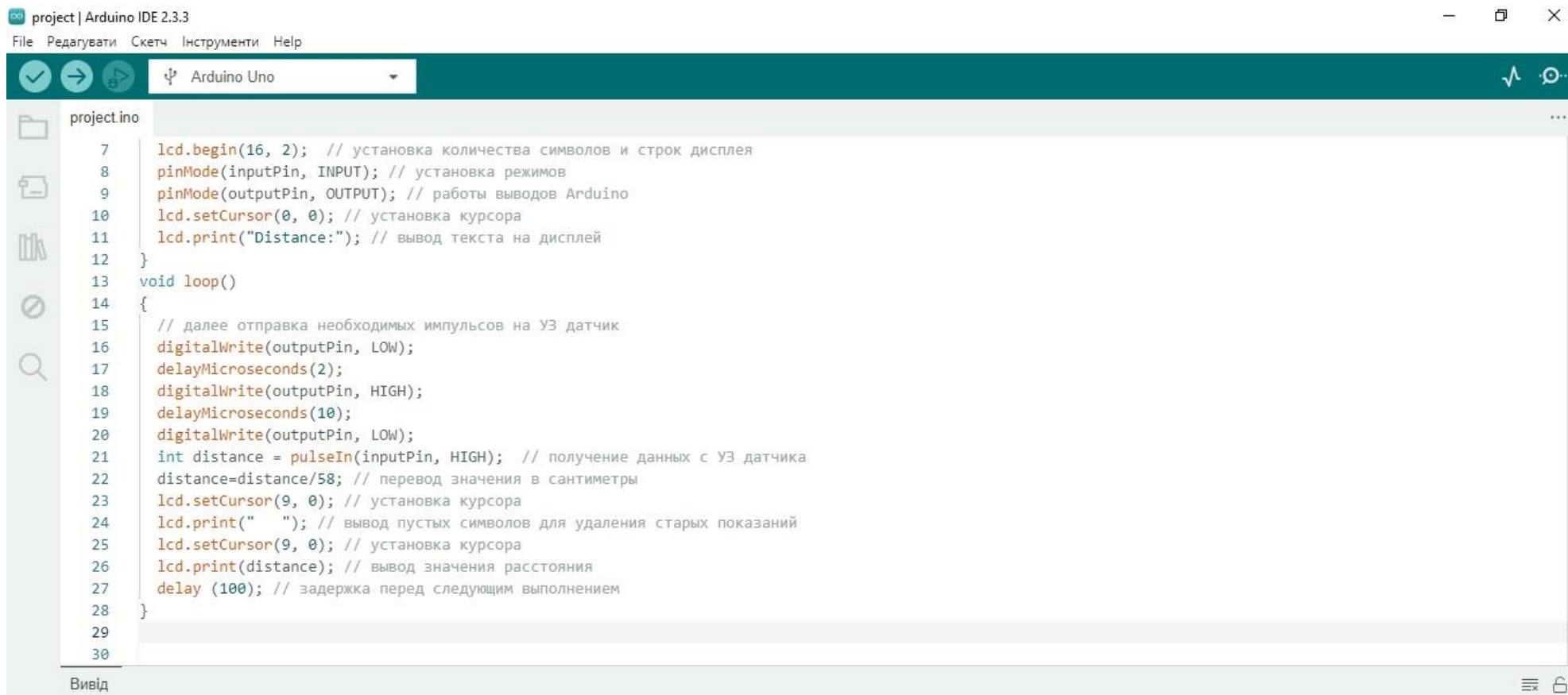
```
int trigPin = 11; //Тригер – жовтий провід
int echoPin = 12; //Ехо – зелений провід
long duration, cm, inches;
void setup() {
  //Serial Port begin
  Serial.begin (9600);
  //ініціалізуєм входи-виходи
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
}
void loop()
{
  // датчик спрацьовує і генерує імпульси шириною 10 мкс чи більше
  // Генеруємо короткий LOW імпульс, щоб утворився «чистий» імпульс
HIGH:
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(5);
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigPin, LOW); // читаємо дані з датчика: значення HIGH, що за-
лежить від часу між відправкою і прийомом
  pinMode(echoPin, INPUT);
  duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
  // перетворення часу у відстань
  cm = (duration/2) / 29.1;
  inches = (duration/2) / 74;
  Serial.print(inches);
  Serial.print("in, ");
  Serial.print(cm);
  Serial.print("cm");
}
```



## ДОДАТОК В СКЕТЧ ДЛЯ РОБОТИ СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ПРОГИНУ ВІЗКІВ

```
#include <LiquidCrystal.h> // підключення LCD бібліотеки
LiquidCrystal lcd (7,8,9,10,11,12); // ініціалізація бібліотеки з зазначенням
пінів підключення до Arduino
int inputPin=5;
int outputPin=6;
void setup()
{
  lcd.begin(16, 2); // встановлення кількості символів та рядків дисплея
  pinMode(inputPin, INPUT); // встановлення режимів
  pinMode(outputPin, OUTPUT); // роботи виводів Arduino
  lcd.setCursor(0, 0); // встановлення курсора
  lcd.print("Distance:"); // вивід тексту на дисплей
}
void loop()
{
  // відправлення необхідних імпульсів на УЗ датчик
  digitalWrite(outputPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(outputPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(outputPin, LOW);
  int distance = pulseIn(inputPin, HIGH); // отримання даних з УЗ датчика
  distance=distance/58; // перетворення значень в сантиметри
  lcd.setCursor(9, 0); // встановлення курсора
  lcd.print(" "); // вивід пустих символів для видалення старих показників
  lcd.setCursor(9, 0); // встановлення курсора
  lcd.print(distance); // вивід значень відстані
  delay (100); // затримка перед наступним виконанням
}
```

## ДОДАТОК Г ІНТЕРФЕЙС СЕРЕДОВИЩА ARDUINO IDE



The screenshot displays the Arduino IDE v.2.3.3 interface. The title bar shows 'project | Arduino IDE 2.3.3'. The menu bar includes 'File', 'Редагувати', 'Скетч', 'Інструменти', and 'Help'. The toolbar contains icons for checking, running, and uploading, along with a dropdown menu set to 'Arduino Uno'. The main editor window shows a sketch named 'project.ino' with the following code:

```
7  lcd.begin(16, 2); // установка количества символов и строк дисплея
8  pinMode(inputPin, INPUT); // установка режимов
9  pinMode(outputPin, OUTPUT); // работы выводов Arduino
10 lcd.setCursor(0, 0); // установка курсора
11 lcd.print("Distance:"); // вывод текста на дисплей
12 }
13 void loop()
14 {
15     // далее отправка необходимых импульсов на УЗ датчик
16     digitalWrite(outputPin, LOW);
17     delayMicroseconds(2);
18     digitalWrite(outputPin, HIGH);
19     delayMicroseconds(10);
20     digitalWrite(outputPin, LOW);
21     int distance = pulseIn(inputPin, HIGH); // получение данных с УЗ датчика
22     distance=distance/58; // перевод значения в сантиметры
23     lcd.setCursor(9, 0); // установка курсора
24     lcd.print(" "); // вывод пустых символов для удаления старых показаний
25     lcd.setCursor(9, 0); // установка курсора
26     lcd.print(distance); // вывод значения расстояния
27     delay (100); // задержка перед следующим выполнением
28 }
29
30
```

The status bar at the bottom left shows 'Вивід' and the bottom right has a hamburger menu icon.

Рисунок Г.1 - Інтерфейс середовища Arduino IDE v.2.3.4 з завантаженим і скомпільованим скетчем для перевірки роботи схеми для вимірювання прогину візків

## ДОДАТОК Д ЗІБРАНА МАКЕТНА СХЕМА

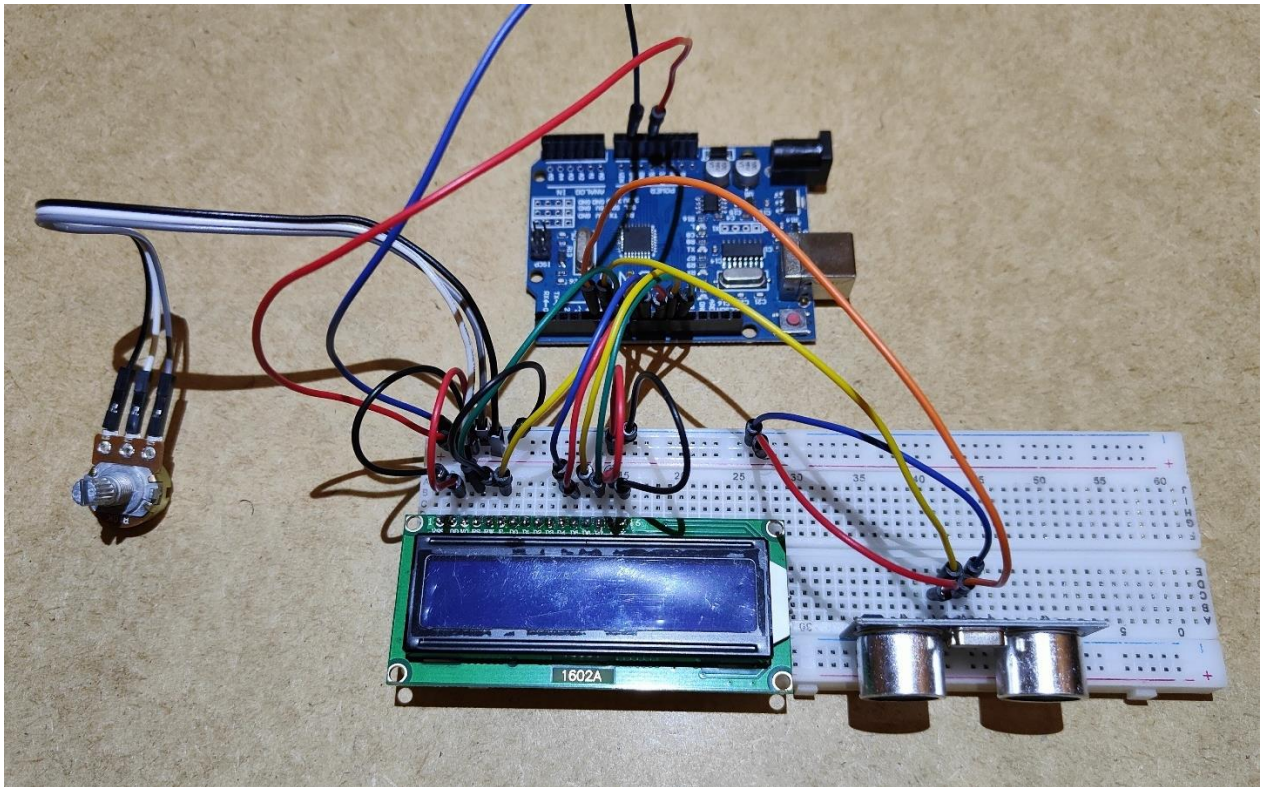


Рисунок Д.1 - Макетна схема з застосуванням плати Arduino Uno, ультразвукового датчика HC-SR04 та дисплея 1602A

## ДОДАТОК Е ПРИКЛАД РОБОТИ МАКЕТНОЇ СХЕМИ

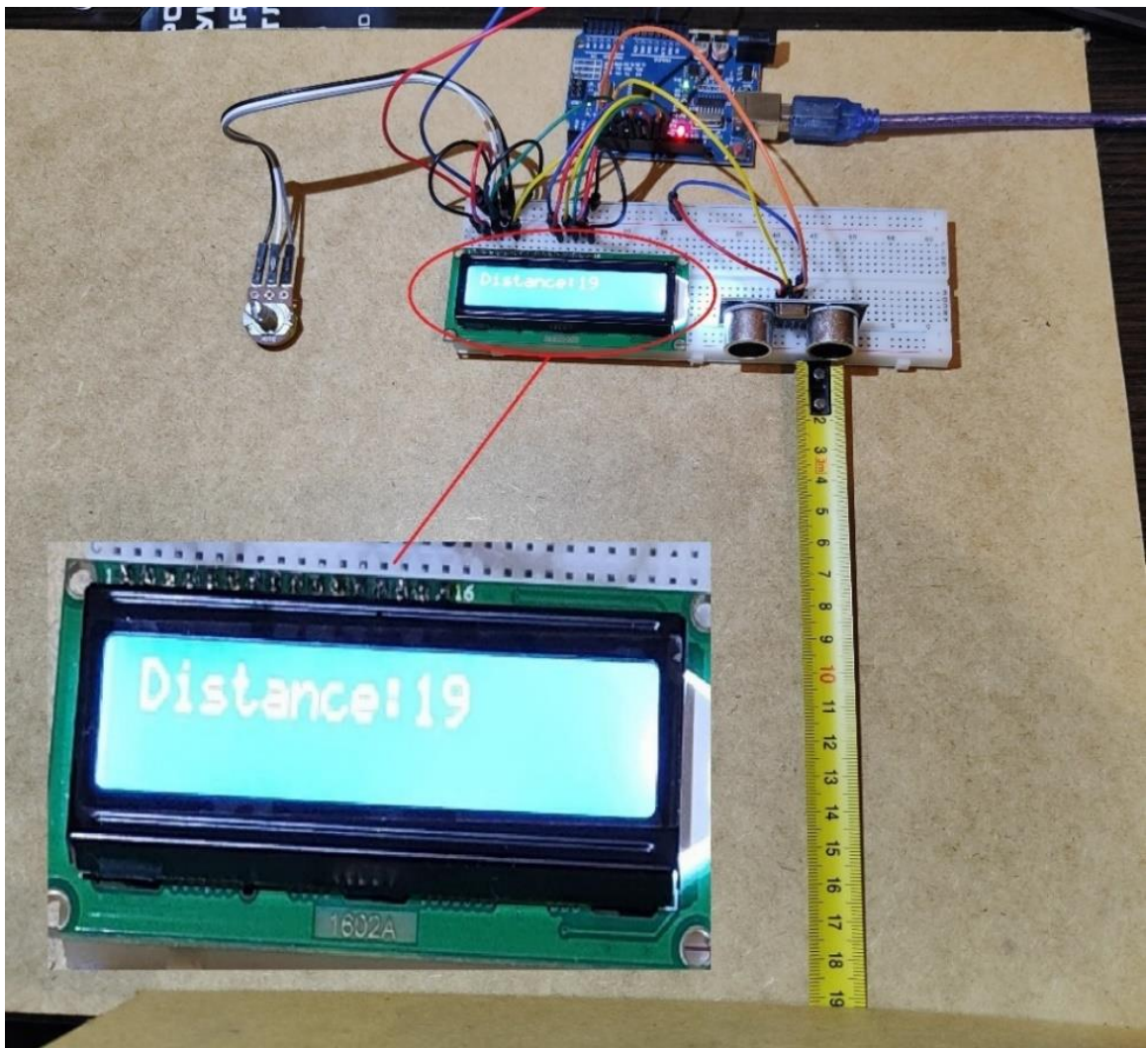


Рисунок Е.1 - Відстань до об'єкта (19см.), реєструється ультразвуковим датчиком HC-SR04 та відображається на дисплеї 1602A

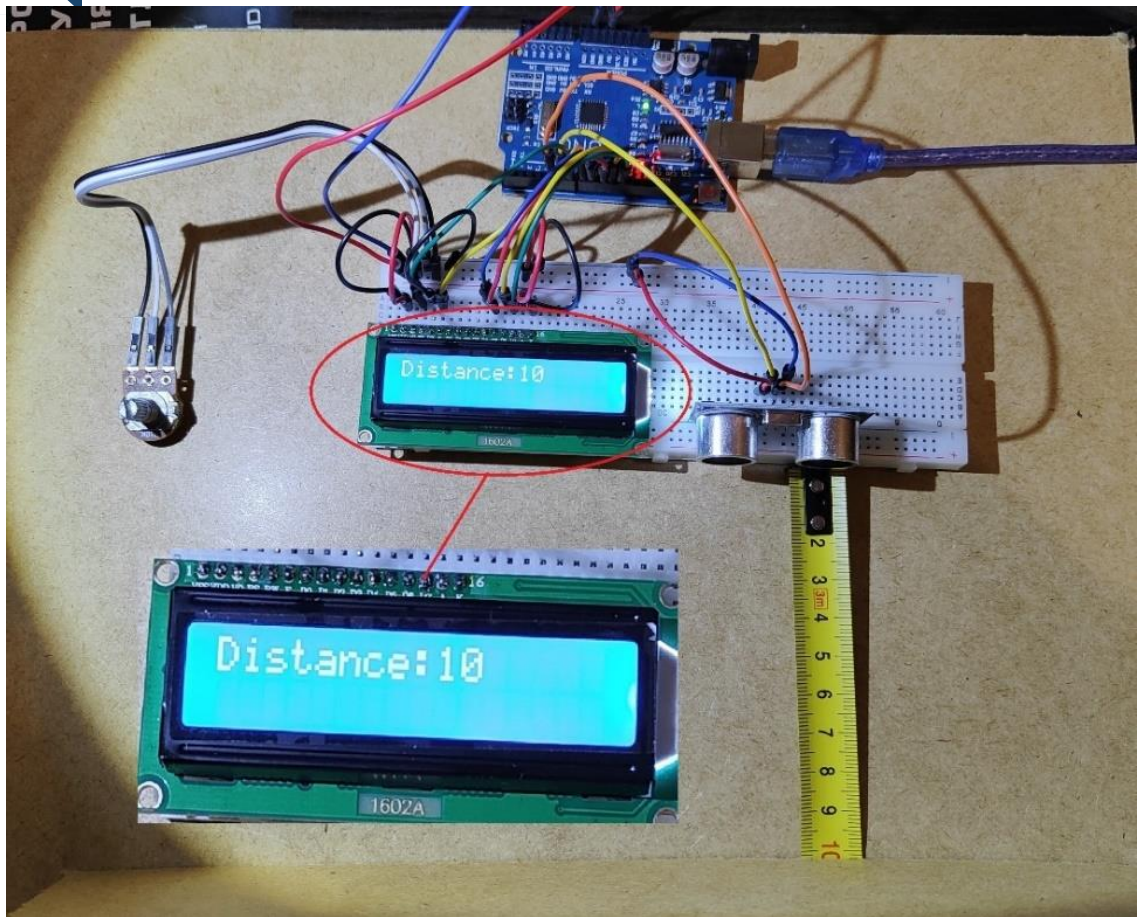


Рисунок Е.2 - Відстань до об'єкта (10см.), реєструється ультразвуковим датчиком HC-SR04 та відображається на дисплеї 1602A