

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

**ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

# **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему: **«Проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 BLE Sense»**

Виконав: студент 4 курсу групи Акт-42сп

Спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(шифр і назва)

Трасковський Максим Назарович

(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., в.о. доцента Татомир А.В.

(Прізвище та ініціали)

Рецензент: к.т.н., доцент Левонюк В.Р.

(Прізвище та ініціали)

**ДУБЛЯНИ-2024**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти  
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

д.т.н., проф. А. М. Тригуба

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Трасковському Максиму Назаровичу

1. Тема роботи: «Проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 BLE Sense»

Керівник роботи Татомир Андрій Володимирович, в.о. доцента  
затверджені наказом по університету від 27.11.2023 року № 641/к-с.

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: вимоги до водяних насосів фермерських господарств; методика проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) \_\_\_\_\_

Вступ.

1. Аналіз стану обслуговування водяних насосів та обґрунтування доцільності проектування інтелектуального пристрою для виявлення їх несправностей.

2. Аналіз об'єкту керування та вибір засобів.

3. Розробка інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 Ble Sense.

4. Охорона праці.

5. Економічна ефективність від інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств.

Висновки та пропозиції.

Список використаної літератури.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): аналіз стану обслуговування водяних насосів та обґрунтування доцільності проектування інтелектуального пристрою для виявлення їх несправностей; вибір засобів для інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств; розробка інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 Ble Sense.

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	<i>Татомир А.В., в.о. доцента кафедри ІТ</i>		
4	<i>Городецький І.М., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва</i>		

7. Дата видачі завдання

27 листопада 2023 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Написання першого розділу</i>	<i>27.11-31.12.23</i>	
2	<i>Виконання другого розділу та аркушів ілюстраційного матеріалу до нього</i>	<i>01.02-05.03.24</i>	
3.	<i>Виконання третього розділу та аркушів ілюстраційного матеріалу до нього</i>	<i>06.03-24.04.24</i>	
4.	<i>Написання розділу «Охорона праці»</i>	<i>25.04-10.05.24</i>	
5.	<i>Написання розділу «Економічна ефективність»</i>	<i>11.05-23.05.24</i>	
6.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та аркушів ілюстраційного матеріалу</i>	<i>24-31.05.24</i>	
7.	<i>Завершення роботи в цілому</i>	<i>01 -10.06.24</i>	

Студент \_\_\_\_\_ Трасковський М.Н.  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Татомир А.В.  
(підпис)

УДК: 004.032.26

Проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 BLE Sense.

Трасковський М.Н. Кафедра ІТ – Дубляни, Львівський НУП, 2024.

Кваліфікаційна робота: 68 с. текст. част., 20 рис., 5 табл., 14 арк. ілюстраційного матеріалу, 54 джерела.

Проаналізовано сучасний стан використання та обслуговування водяних насосів. Подано основні причини виходу з ладу водяних насосів. Виконано аналіз інтелектуальних пристроїв для виявлення несправності водяних насосів. Здійснено опис методів виявлення несправностей у відцентрових насосах. Обґрунтовано доцільність проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 Ble Sense.

Наведено особливості використання інтелектуальних пристроїв для виявлення несправності водяних насосів. Розроблено функціональну схему запропонованої системи виявлення несправностей водяних насосів. Вибрано засоби для пристрою виявлення несправностей водяних насосів. Виконано програмування пристрою Arduino Nano 33 BLE Sense.

Описано конструкцію інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств. Виконано налаштування та підготовка інтелектуального пристрою. Проведено навчання нейронної мережі. Проведено інтеграцію моделі на пристрої та механізми зв'язку.

Запропоновано заходи із охорони праці під час проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів. Розраховано економічну ефективність від інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ОБСЛУГОВУВАННЯ ВОДЯНИХ НАСОСІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЇХ НЕСПРАВНОСТЕЙ .....	
	9
1.1. Сучасний стан використання та обслуговування водяних насосів.....	9
1.2. Основні причини виходу з ладу водяних насосів .....	10
1.3. Аналіз інтелектуальних пристроїв для виявлення несправності водяних насосів.....	12
1.4. Опис методів виявлення несправностей у відцентрових насосах.....	21
1.5. Обґрунтування доцільності проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 Ble Sense .....	23
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИБІР ЗАСОБІВ	
2.1. Особливості використання інтелектуальних пристроїв для виявлення несправності водяних насосів .....	25
2.2. Розробка функціональної схеми запропонованої системи виявлення несправностей водяних насосів .....	26
2.3. Плата Arduino Nano 33 BLE Sense.....	28
2.4. Модуль NodeMCU на основі чіпа ESP8266.....	31
2.4. Програмування пристрою Arduino Nano 33 BLE Sense .....	33
2.5. Створення моделі штучної нейронної мережі .....	34
РОЗДІЛ 3.....	39
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ ВОДЯНИХ НАСОСІВ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ НА ОСНОВІ ARDUINO NANO 33 BLE SENSE .....	
	39
3.1. Опис конструкції інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств .....	39

3.2. Налаштування та підготовка інтелектуального пристрою .....	40
3.3. Навчання нейронної мережі .....	41
3.4. Інтеграція моделі на пристрої та механізми зв'язку.....	43
РОЗДІЛ 4.....	47
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....	47
4.1. Аналіз умов праці та шкідливих виробничих чинників.....	47
4.2. Організація робочого місця під час створення інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів .....	48
4.3. Створення мікроклімату на робочому місці.....	49
4.4. Зниження рівня шуму та забезпечення електробезпеки на робочому місці	51
4.5. Пожежна безпека на робочому місці .....	52
РОЗДІЛ 5.....	55
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ ВОДЯНИХ НАСОСІВ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ НА ОСНОВІ ARDUINO NANO 33 BLE SENSE.....	55
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61
ДОДАТКИ.....	66
Додаток А. Код програмування Arduino Nano 33 Ble Sense для запису та передачі даних датчиків.....	67

## ВСТУП

У сучасному сільському господарстві автоматизація та використання передових технологій стають все більш важливими для підвищення ефективності виробництва та забезпечення надійності обладнання [16]. Однією з ключових складових цього процесу є ефективне управління системами водопостання, яке включає в себе регулярне контролювання та підтримку роботи водяних насосів.

Незважаючи на досягнення сучасних технологій, проблеми з обслуговуванням та виявленням несправностей у системах водопостання залишаються актуальними завданнями для фермерських господарств. При цьому виникає необхідність у створенні інтелектуальних пристроїв, які забезпечать надійний моніторинг роботи водяних насосів та навчатися виявляти можливі несправності на ранніх етапах.

Ця кваліфікаційна робота спрямована на розробку та проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправностей водяних насосів фермерських господарств з використанням технологій Інтернету речей (IoT) та мікроконтролерів [18]. Основною платформою для реалізації цього пристрою обрано Arduino Nano 33 BLE Sense, яка володіє високою продуктивністю та можливостями для імплементації різноманітних датчиків та алгоритмів машинного навчання.

У наступних розділах цієї роботи розглянуто детальний аналіз проблематики виявлення несправностей водяних насосів, огляд існуючих підходів до їх моніторингу та діагностики. Далі представлений процес проектування та реалізації інтелектуального пристрою на основі обраної платформи, включаючи розробку апаратної та програмної частини. Нарешті, в останньому розділі роботи наведено результати експериментальних досліджень та висновки, що стосуються ефективності та перспектив використання розробленого пристрою в сільському господарстві.

Отже, доцільність цієї роботи полягає в створенні пристрою, який допоможе фермерам забезпечити надійне та ефективне функціонування систем водопостання, знизити витрати на обслуговування та ремонт обладнання, а також підвищити загальну їх продуктивність та прибутковість.



# РОЗДІЛ 1.

## АНАЛІЗ СТАНУ ОБСЛУГОВУВАННЯ ВОДЯНИХ НАСОСІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЇХ НЕСПРАВНОСТЕЙ

### 1.1. Сучасний стан використання та обслуговування водяних насосів

Сучасні системи водопостачання значною мірою покладаються на водяні насоси, які мають вирішальне значення для розширення зрошуваних площ та підвищення ефективності діяльності. Згідно з дослідженням, проведеним продовольчою та сільськогосподарською організацією (FAO), країни, що розвиваються, за прогнозами збільшать свої зрошувані площі на 2420 квадратних кілометрів до 2030 року [30]. Із зростанням попиту на ефективні зрошувальні системи зростає потреба в обслуговуванні зрошувальних насосів; отже, вирішення загальних операційних помилок, таких як кавітація, стає обов'язковим.

Кавітація у водяних насосах виникає, коли доступна чиста додатна висота всмоктування падає нижче необхідної чистої додатної висоти всмоктування, внаслідок чого абсолютний статичний тиск усередині насоса падає нижче тиску насиченої пари води при даній температурі. Це призводить до утворення бульбашок повітря, які згодом згортаються, створюючи удари міні-молотка високого тиску [22]. Кавітація може призвести до кількох небажаних ефектів, включаючи погіршення гідравлічної продуктивності насоса, ерозію матеріалу поблизу бульбашок, що руйнуються, вібрацію стінок насоса та пов'язане з цим пошкодження [23].

Щоб запобігти та усунути кавітацію в іригаційних відцентрових водяних насосах, раннє виявлення явища має вирішальне значення. Існують різні методи моніторингу умов роботи насоса під час роботи або шляхом огляду внутрішньої

частини насоса. Однак традиційне реактивне обслуговування та інвазивні методи мають значні недоліки порівняно з неінвазивними альтернативами.

Перехід до проактивного технічного обслуговування потребує всебічного дослідження через необхідність цифровізації процесу, планування та організованого підходу до технічного обслуговування [48]. Неінвазивні методи, такі як акустична емісія, аналіз вібрації та безсенсорне виявлення з використанням відхилень в електричних сигналах двигуна, набувають популярності, оскільки вони мінімізують час простою системи та пов'язані з цим витрати [28].

## **1.2. Основні причини виходу з ладу водяних насосів**

Бувають різні типи водяних насосів, що найчастіше використовуються у системах водопостачання. Типи водяних насосів, що найчастіше використовуються (зустрічаються) у системах водопостачання, включають відцентрові (багатоступеневі занурювальні) (59%), відцентрові (багатоступеневі з приводом від валу) (47%), відцентрові (одноступінчасті) (29%), поршневі (підйомні (глибокі свердловини)) (24%), периферійні (занурювальні) (47%), поршневі (всмоктувальні (неглибокі свердловини)) (18%) і роторні (з гвинтовим ротором) (12%), як показано на рисунку 1.1.

Відцентрові (поверхневі) та занурювальні насоси є найпоширенішими водяними насосами, які використовуються в проектах водопостачання. Це пов'язано з тим, що більшість джерел водопостачання в сільській місцевості - це або свердловини, які потребують насосів для видобутку води, або поверхневі води, які потребують насосів для перекачування води до сховищ або розподільчих вузлів. За даними Корпорації (2003), відцентрові насоси є кращими порівняно з іншими поверхневими насосами, оскільки вони економічні для великих потоків і мають низьку вартість для таких рідин, як вода.

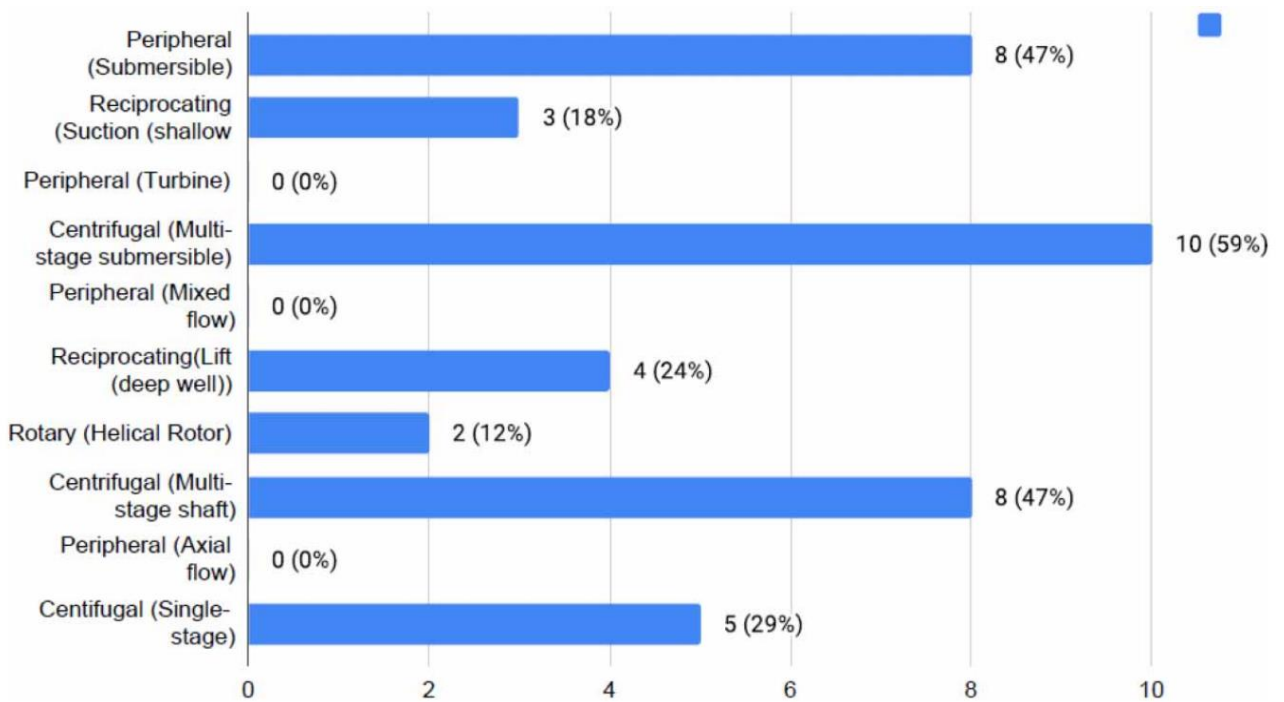


Рисунок 1.1 – Типи проблем з водяними насосами, які часто зустрічаються в системах водопостачання [38]

Найпоширенішими проблемами водяних насосів, виявленими в дослідженні [38], є надмірне споживання енергії (82%), витік ущільнень (53%), відсутність або низький потік (41%), відсутність або низький тиск (35%), надмірний шум або вібрація (24%) та інші (0,1%), як показано на рисунку 1.2.

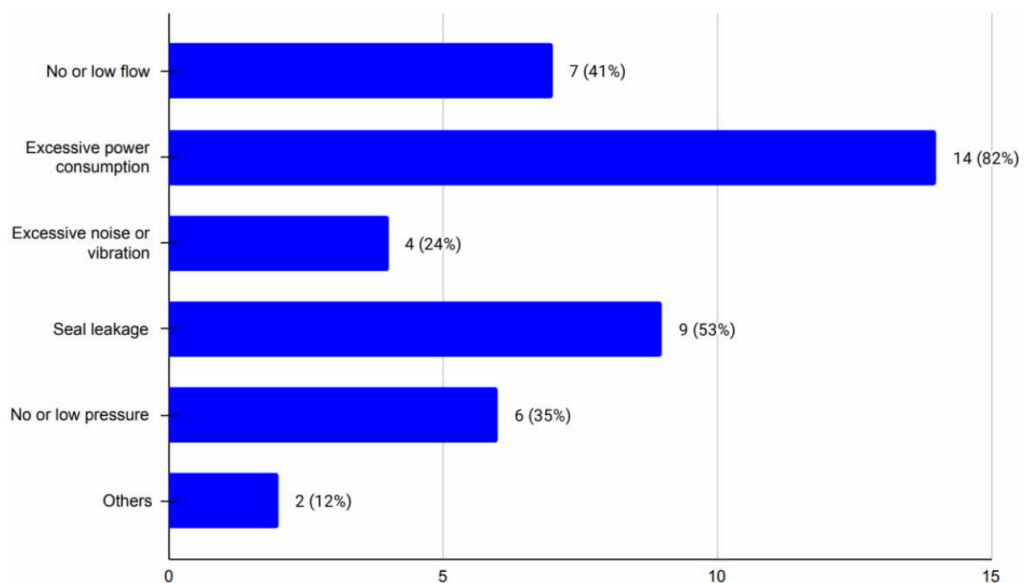


Рисунок 1.2 – Поширені проблеми з водяними насосами, що виникають у системах водопостачання [38]

Аналогічне дослідження було проведене McKee та іншими дослідниками, де вони згадували вібрацію, незадовільне ущільнення, що призводить до витоків, рециркуляція всмоктування і нагнітання та надмірне енергоспоживання як найпоширеніші проблеми водяних насосів.

Також відомо, що основною проблемою водяних насосів є надмірне енергоспоживання. Водяні насоси є значною мірою енергоємними, і на них припадає значна частка рахунків за електроенергію, пов'язаних з роботою системи водопостачання. Надмірна потужність насоса є ознакою того, що з ним може виникнути низка різних проблем. Однією з основних проблем, які призводять до надмірного споживання електроенергії і, можливо, в кінцевому підсумку до поломки, є наявність малих або великих концентрацій частинок у рідині. Навіть якщо рідина виглядає чистою, вона може мати дуже малу концентрацію частинок, що може призвести до довгострокових проблем з продуктивністю, оскільки зазори поступово збільшуються через зношування деталей. Це може статися в будь-якому відцентровому насосі, незалежно від того, наскільки прозорою або чистою виглядає рідина.

### **1.3. Аналіз інтелектуальних пристроїв для виявлення несправності водяних насосів**

Протягом останніх кількох десятиліть було вивчено багато неінвазивних методів обслуговування, деякі більш детально та масштабніше, ніж інші [33]. Вчені розробили цифровий двійник відцентрового насоса для точного прогнозування його робочого стану за заданим набором параметрів [15].

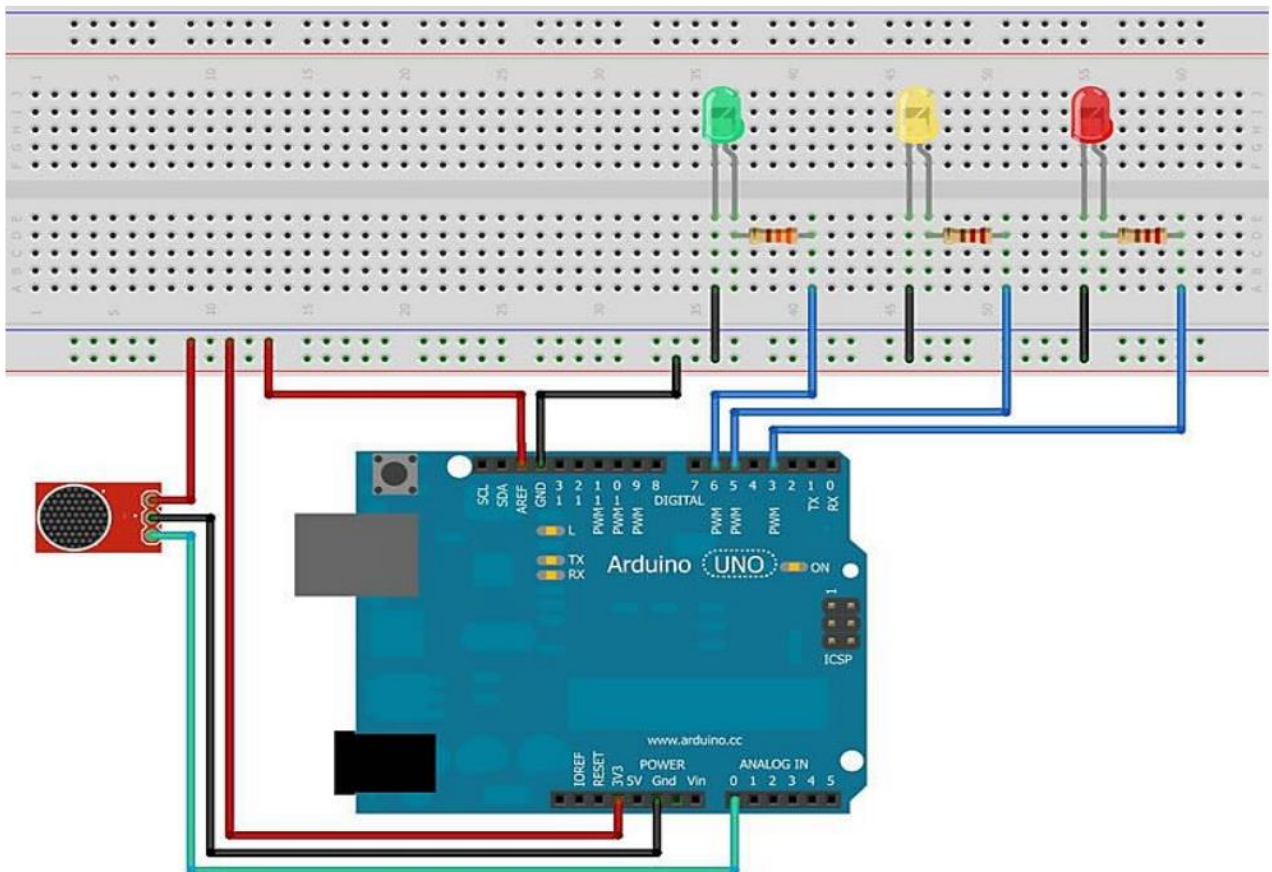


Рисунок 1.3 – Підключення ланцюга системи IoT [15]

На рис. 1.3 показано схему підключення системи IoT. Кавітаційні та некавітаційні випробування проводилися на насосі шляхом аналізу сигналів вібрації в частотній області на основі діапазону частот 0-1 кГц, отриманих від робочого колеса насоса за допомогою звукових датчиків, інтегрованих з мікроконтролером Arduino Uno, за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є (FFT). Тиск на вході насоса контролюється за допомогою кульового крана, підключеного до відцентрового насоса. Також для підвищення надійності було використано середнє значення тесту, повтореного п'ять разів. В експериментальному тесті в якості робочої рідини використовується вода з температурою 25 °С. Для збору результатів тесту вода була на позначці 30 літрів як для кавітаційної, так і для некавітаційної моделей.

Рекомендації для подальших досліджень: – включення в систему датчиків тиску і температури підвищить точність прогнозування на початку кавітації. Також можна використати модуль Bluetooth/Wi-Fi для надсилання сигналів на

телефон оператора. Додавання відеокамери для моніторингу кавітації для отримання кращих і точніших результатів.

Візуалізація потоку за допомогою зображення утворення кавітації великим планом є ще одним інструментом для макроскопічної ідентифікації, широко вивченого у роботі [39].

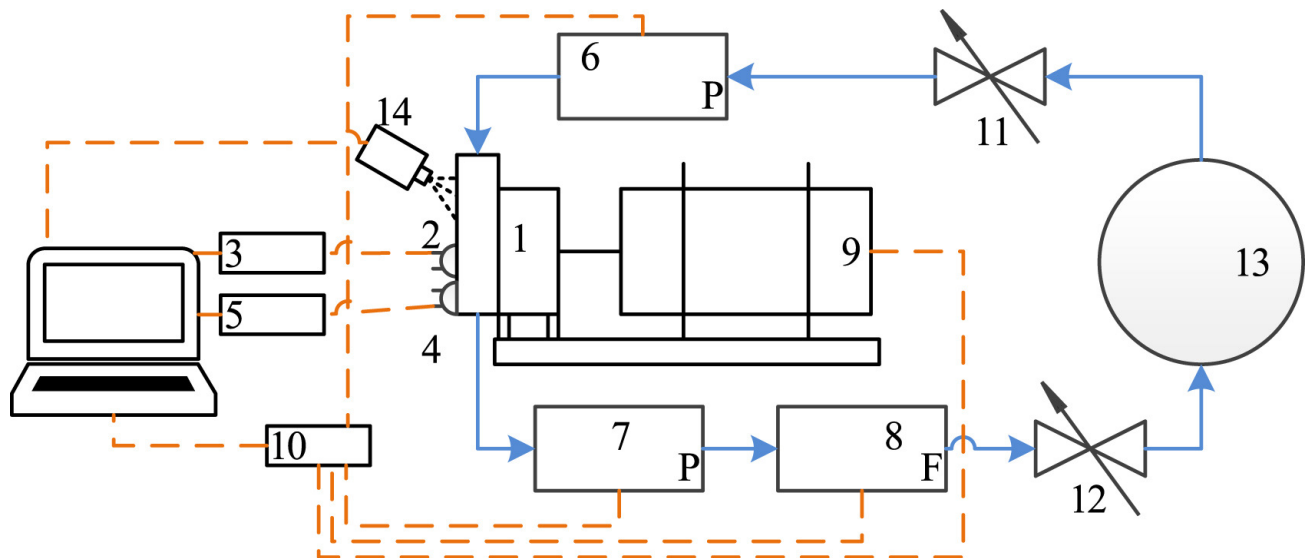


Рисунок 1.4 – Схема конфігурації лабораторної випробувальної установки [39]:

1 – насос; 2 – датчик акселерометра; 3 – DAQ для вимірювань вібрації; 4 – Датчик АЕ; 5 – DAQ для вимірювань АЕ; 6 – всмоктування датчика тиску; 7 – розряд датчика тиску; 8 – датчик витрати; 9 – електродвигун і датчик швидкості обертання; 10 – DAQ для вимірювання тиску, витрати та швидкості обертання; 11 – всмоктувальний клапан; 12 – випускний клапан; 13 – резервуар для води, 14 – камера

Це дослідження безпосередньо пов'язує геометрію робочого колеса з величиною кавітації, надаючи розуміння для кращого проектування та складання зрошувальних насосів.

Обчислювальні методи, такі як обчислювальна гідродинаміка (CFD), були доведені ефективними при аналізі даних про вібрацію та звук для різних типів компресорів, включаючи насоси та вентилятори [24].

Штучні нейронні мережі (ANN) і згорткові нейронні мережі (CNN) були широко розроблені для аналізу сигналів і зображень, відповідно, демонструючи значний успіх у виявленні робочих умов на різних типах насосів [47, 54].

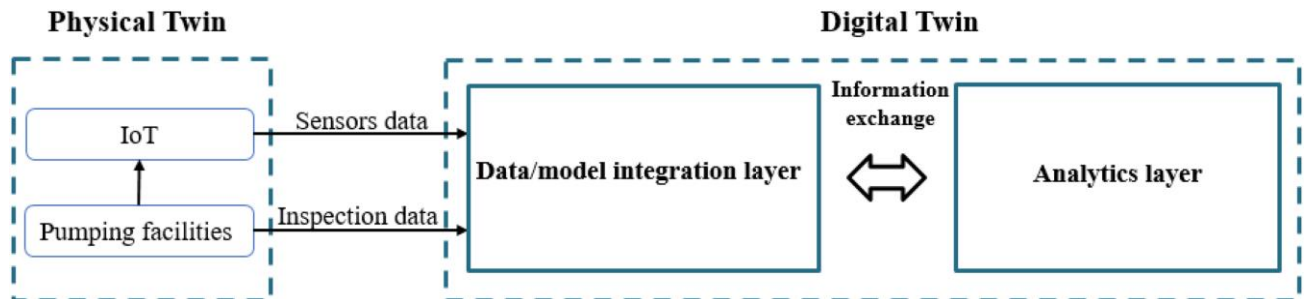


Рисунок 1.5 – Схема структури цифрового двійника [47]

Структура цифрового двійника зазвичай складається з двох основних компонентів, а саме фізичного двійника та цифрового двійника (див. рис. 1.5).

Фізичний двійник включає 1) фізичні активи, якими тут є насоси; 2) Інтернет речей (IoT), наприклад датчики, які отримують і передають дані про продуктивність або стан фізичного активу.

Цифровий двійник передбачає: 1) інтеграцію даних і моделей, у якій дані з різних джерел, таких як комп'ютеризовані системи технічного обслуговування (наприклад, дані перевірки) та IoT (наприклад, дані датчиків), керуються та інтегруються в сховище даних, і 2) аналітику даних, є найважливішим компонентом цифрового двійника, який виконує прогнози та створює інформацію для процесів прийняття обґрунтованих рішень.

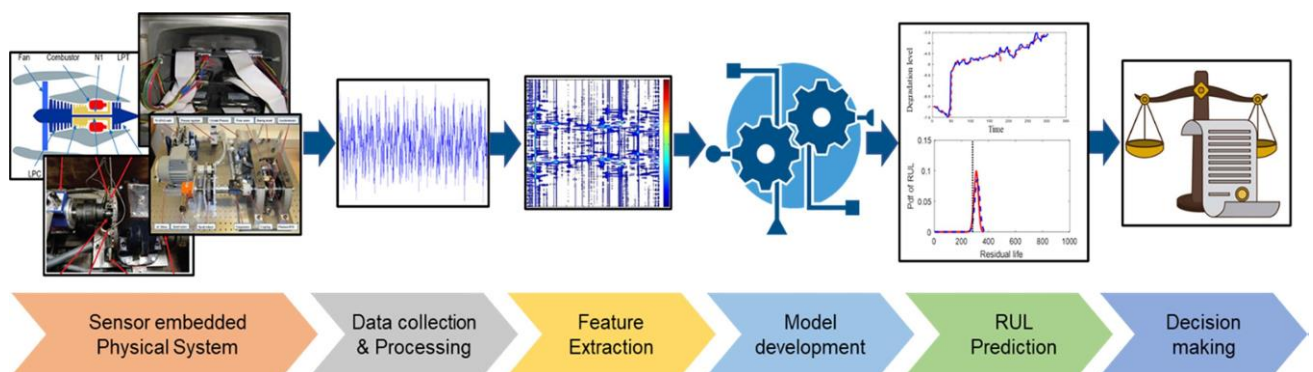


Рисунок 1.6 – Процес прогнозного обслуговування водяних насосів [54]

Серед доступних джерел даних для моніторингу стану насосів і виявлення кавітації дані про звук і вібрацію отримали найбільше використання [51]. Статистичний аналіз акустичних даних у часовій і частотній областях надає цінну інформацію про взаємозв'язок між відкриттям всмоктувального клапана та утворенням кавітації. Це співвідношення було вивчено як для промислових, так і для лабораторних установок [40].

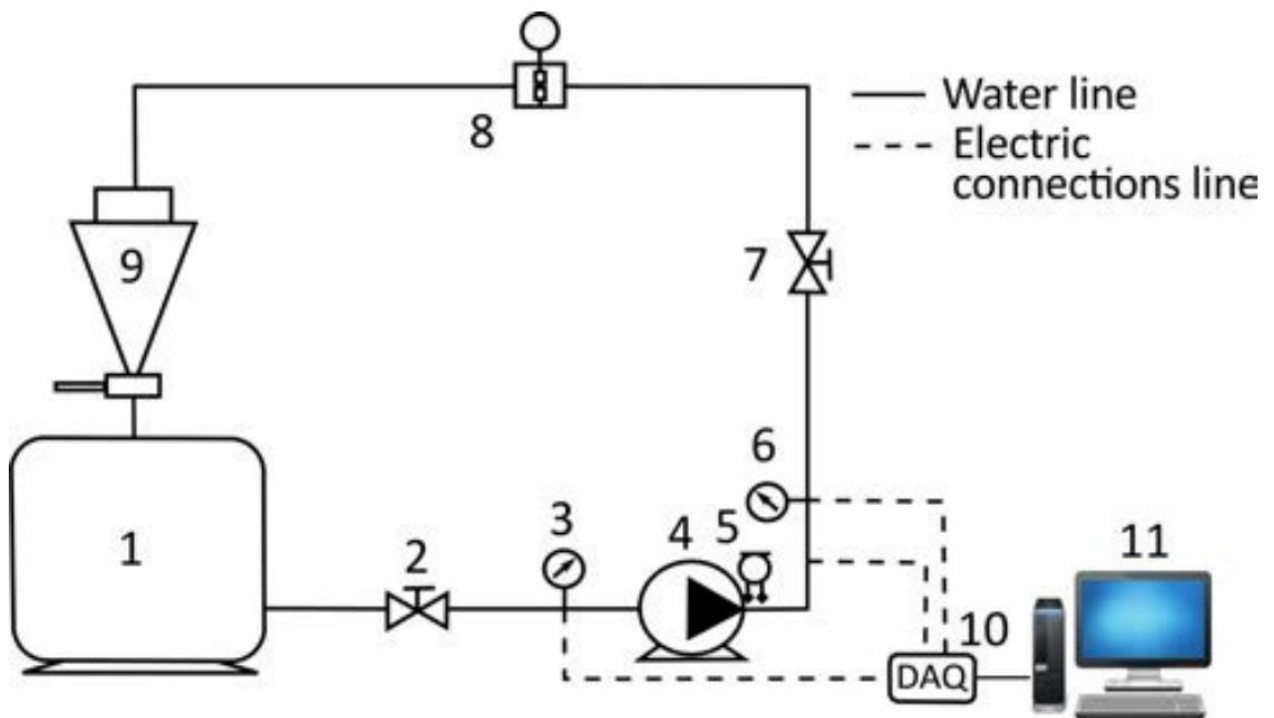


Рисунок 1.7 – Експериментальне налаштування компонентів та складових системи водопостачання [16]: 1 - резервуар для води, 2 - всмоктувальний клапан, 3 - датчик тиску на всмоктуванні, 4 - відцентровий насос, 5 - мікрофон, 6 - датчик тиску нагнітання, 7 - нагнітальний клапан, 8 - витратомір води, 9 - бункер, 10 - DAQ, 11 - комп'ютер

У роботі [16] визначили три чіткі області, де зміни звуку, що видається насосом, змінюються від відсутності змін до значних змін, залежно від зміни відкриття всмоктувального клапана.

Дослідженнями встановлено, що акустичні дані не тільки допомагають у виявленні кавітації та моніторингу стану насоса, але також дозволяють оцінити масштаб кавітації та кількість бульбашок у рідині [34].



Нарешті, методи глибокого навчання, включаючи нові та вдосконалені моделі CNN, продемонстрували підвищену надійність у діагностиці відхилень у роботі насоса [32] і витоку трубопроводу [52] за допомогою акустичних даних.

Пряма кореляція між вібрацією та робочим станом насоса також широко спостерігалася та вивчалася, забезпечуючи основу для подальших досліджень виявлення стану та класифікації [31].

Вчені довели, що поєднання технології Інтернету речей (IoT) і передових методів машинного навчання пропонує економічно ефективні та зручні інструменти для моніторингу умов роботи зрошувального насоса з високою надійністю [35].

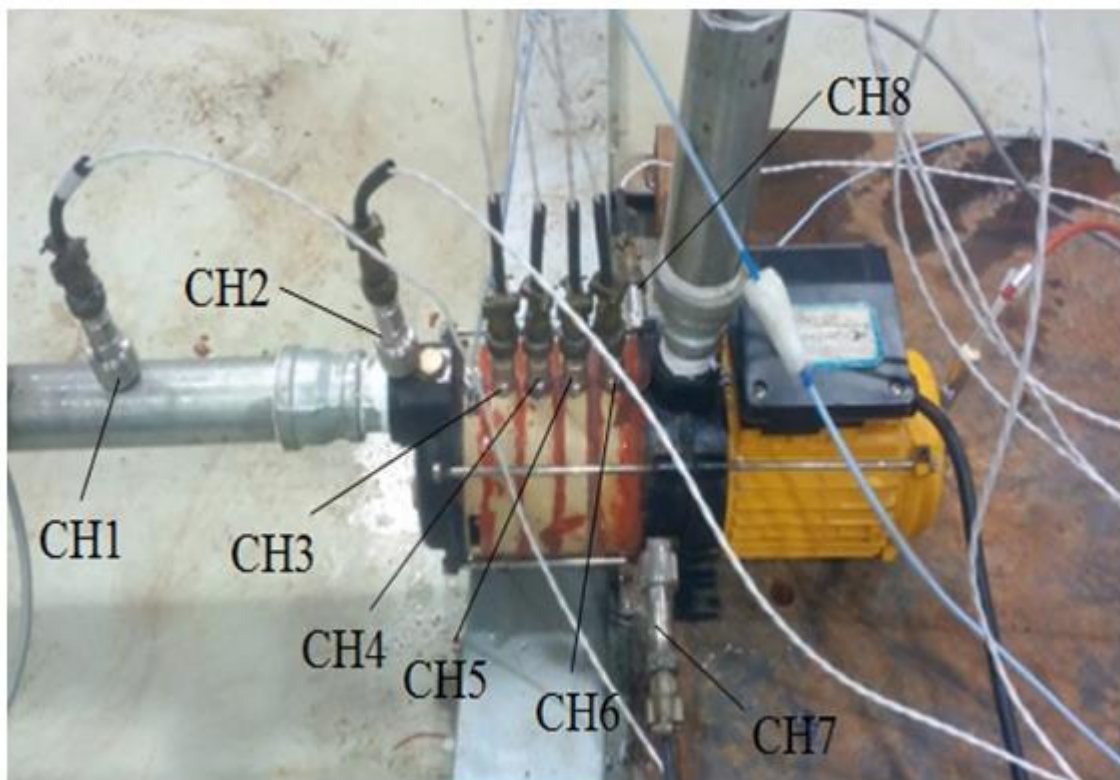


Рисунок 1.8 – Установка датчиків вібрації [35]

У цьому дослідженні [35] було виміряно та проаналізовано стан вібрації консольного багатоступінчастого відцентрового насоса для різних витрат. Результати показали, що витрати справляли чіткий вплив на спектр вібрації на вході та виході консольного багатоступінчастого відцентрового насоса.

Попередні дослідження також вивчали використання штучного інтелекту (AI) у профілактичному обслуговуванні, використовуючи такі методи, як алгоритми опорних векторних машин (SVM) для виявлення несправності насоса на основі вібрації [29, 25].

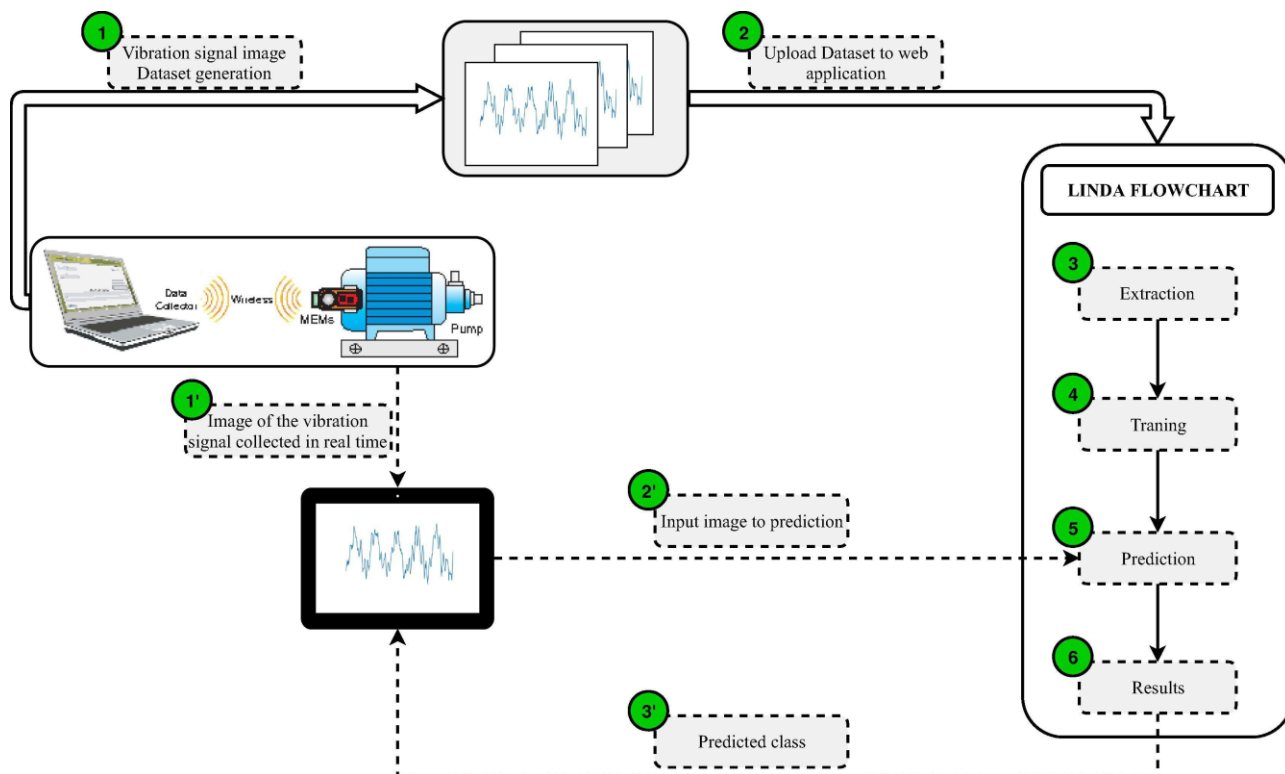


Рисунок 1.9 – Блок-схема запропонованого методу [29]

MEMS-датчик, прикріплений до насоса, надсилає вібраційний сигнал на комп'ютер, який створює набір даних зображення вібраційного сигналу. Оператор завантажує цей набір даних у веб-програму (LINDA), яка може видобувати та класифікувати зображення.

Інші методи, включаючи алгоритми K-Nearest Neighbor (KNN) і Classification Tree, були використані для діагностики несправних операцій у мікромережах [25].

У цьому дослідженні як акустичні, так і вібраційні дані отримані від відцентрового насоса за допомогою пристрою смартфона, щоб оцінити, який сигнал є найкращим для використання. Акустичні дані можна отримати за допомогою мікрофона будь-якого типу в безпосередній близькості від насоса. Дані про вібрацію можуть бути отримані за допомогою контактного

вимірювання, використовуючи такі інструменти, як акселерометри, прикріплені до джерела вібрації, або безконтактного вимірювання, яке використовує електромагнітне випромінювання від передачі даних [13].

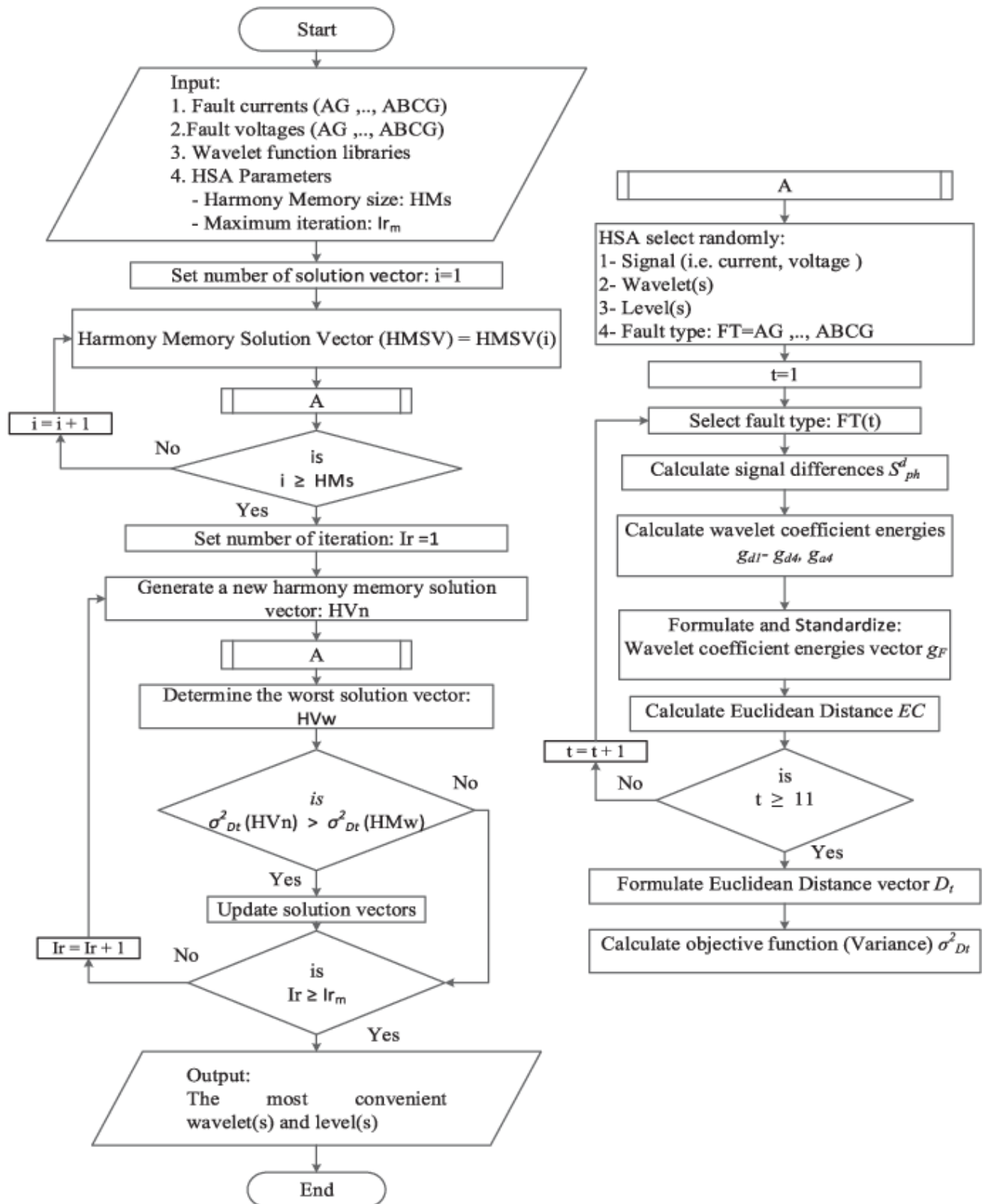


Рисунок 1.10 – Алгоритм реалізації HSA [13]

Виявлення явища кавітації та визначення вікна його появи у відцентрових насосах має вирішальне значення як для профілактичного обслуговування, так і для оптимальної конструкції механічних компонентів, таких як лопаті. Кіпариссіс і Маргаріс досліджували вплив конструктивних параметрів на утворення кавітації та загальну продуктивність відцентрових насосів, наголошуючи на важливості розуміння того, де і як виникає кавітація в різних конструкціях насосів [32, 36].

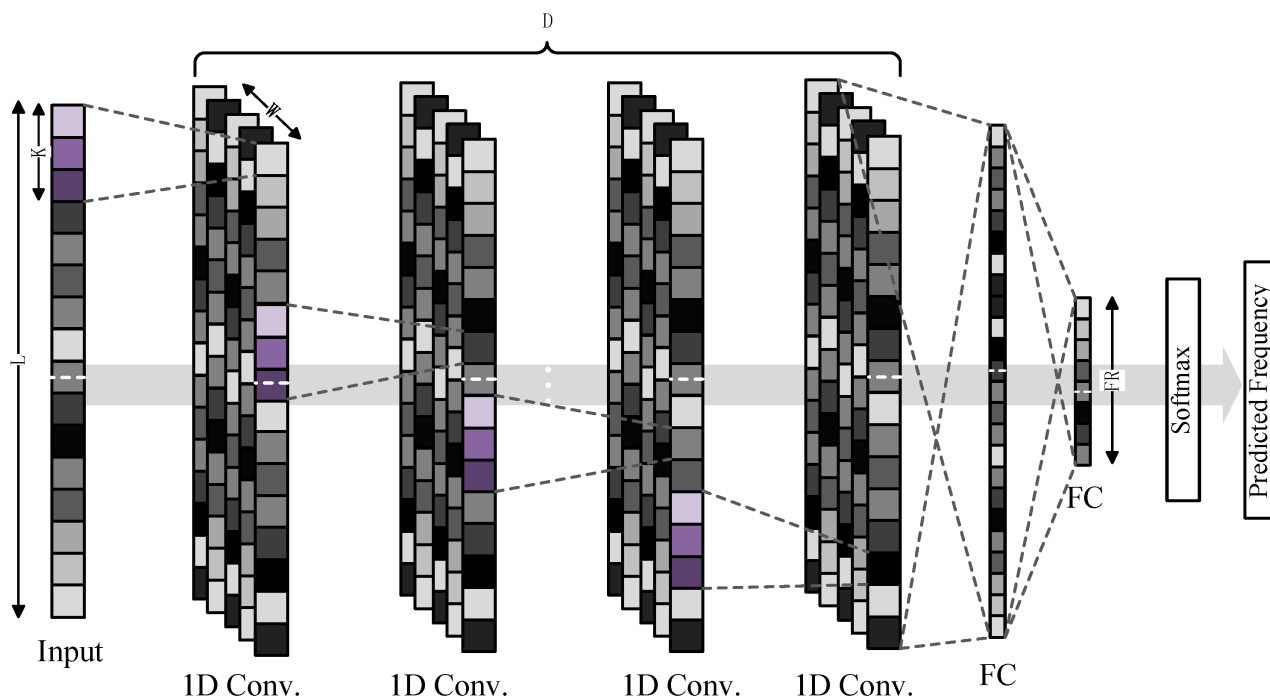


Рисунок 1.11 – Архітектура згорткової нейронної мережі запропонованого методу [36]

Попередні дослідження, зосереджені на виявленні та моніторингу кавітації в зрошувальних насосах, базувалися на лабораторних установках і складних системах збору даних з промисловими датчиками вібрації чи акустичної емісії або навіть високотехнологічними камерами [40, 32, 36].

#### 1.4. Опис методів виявлення несправностей у відцентрових насосах

Існує потреба у оцінці та порівнянні чотирьох стандартних методів класифікації з використанням необроблених сигналів з недорогої платформи збору даних, зрештою виявивши простий, але дуже надійний алгоритм для виявлення кавітації.

Короткий перелік основних методів виявлення кавітації у відцентрових насосах наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Методи виявлення несправностей у відцентрових насосах

Метод виявлення	Опис
Цифрові двійники та імітаційні моделі	Точне прогнозування робочого стану відцентрового насоса за допомогою імітаційних моделей
Безсенсорне виявлення	Використання відхилень в електричних сигналах двигуна для виявлення кавітації
Аналіз вібрації	Моніторинг вібрацій, спричинених нестабільністю, спричиненою кавітацією
Акустичний емісійний аналіз	Виявлення акустичних сигналів, що виникають під час кавітації
Візуалізація потоку	Зображення утворення кавітації великим планом для вивчення геометрії робочого колеса та величини кавітації
Обчислювальна гідродинаміка (CFD)	Аналіз даних про вібрацію та звук для різних типів компресорів, включаючи насоси та вентилятори
Штучні нейронні мережі (ШНМ)	Використання нейронних мереж для аналізу сигналів і зображень для визначення робочих умов
Згорткові нейронні мережі (CNN)	Використання моделей CNN для діагностики відхилень у роботі насоса та витоків трубопроводів за допомогою акустичних даних

Використовуючи дані про сигнали та вібрацію з мінімальною обробкою (без виділення функцій) і використовуючи методи машинного й глибокого

навчання, дослідники досліджували їхню ефективність у виявленні несправностей і моніторингу стану відцентрових насосів, надаючи безцінне розуміння для майбутніх досягнень у інтегрованому Інтернеті речей реальних насосах. програми для виявлення несправностей і моніторингу роботи.

Слід особливу увагу приділити моделюванню реальної системи водопостачання та використанню недорогого пристрою, який одночасно отримує звукові та вібраційні дані, якими володіють фермери та оператори. Поєднуючи ці дані з надійним, надійним алгоритмом, можна досягти раннього виявлення в реальному часі, а також зробити профілактичне технічне обслуговування та проактивне керування відцентровими насосами.

Вимірювання потребує установки, що складається з резервуару для води, одноступінчастого відцентрового насоса, датчиків і трансмітерів тиску, витратоміра та гідравлічного трубопроводу з контрольними клапанами та манометрами. Дані про вібрацію були отримані за допомогою вбудованого в смартфон осьового акселерометра та програмного забезпечення для запису, тоді як звукові сигнали були зафіксовані за допомогою вбудованого мікрофона смартфона.

Можна порівнювати отримані сигнали за різних умов експлуатації, посилаючись на робочу криву виробника та теоретичні розрахунки оптимальної ефективності насоса. Згодом експериментальні результати слід проаналізувати, зосереджуючись на точності використаних методів класифікації та кореляції даних вібрації вздовж кожної осі з еволюцією явища кавітації.

Методи класифікації вібраційних сигналів досягли загального показника успіху понад 90%, при цьому методи KNN і SVM досягли 100% точності для наборів даних у напрямку потоку, CNN досяг майже 97% точності, а метод дерева класифікації досяг приблизно 90% точності. Навпаки, методи класифікації звукових сигналів досягли лише 30% точності, а метод SVM досяг максимального показника 54% точності, що вказує на те, що звукові дані є менш надійними, ніж дані вібрації, і більш сприйнятливі до таких факторів, як навколишній шум.

## **1.5. Обґрунтування доцільності проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 BLE Sense**

На сьогоднішній день фермерські господарства мають потребу у впровадженні передових технологій для підвищення ефективності та продуктивності виробництва. Одним з важливих аспектів є забезпечення безперебійної роботи систем водопостачання, оскільки вони є ключовим елементом забезпечення достатнього рівня зволоження ґрунту та врожаю, а також інших виробничих процесів. Проте, часті несправності водяних насосів можуть призвести до значних втрат у врожаї та фінансових втрат для фермерських господарств.

Традиційні методи моніторингу та діагностики водяних насосів часто є недостатньо ефективними та не забезпечують оперативного виявлення несправностей на ранніх етапах. Фермери зіштовхуються з проблемами, пов'язаними з високими витратами на обслуговування та ремонт обладнання, а також з неочікуваними перебоями у роботі, що можуть призвести до значних втрат врожаю.

В останні роки технології Інтернету речей (IoT) та мікроконтролерів стали широко використовуватися в аграрному секторі для вдосконалення систем управління та моніторингу виробництва. Використання мікроконтролерів, таких як Arduino Nano 33 BLE Sense, дозволяє створити надійні та ефективні інтелектуальні пристрої, здатні оперативно реагувати на зміни у стані обладнання та автоматично виявляти можливі несправності.

Проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправностей водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 BLE Sense має потенційні переваги, такі як:

- ✓ зниження витрат на обслуговування та ремонт обладнання за рахунок оперативного виявлення несправностей;

- ✓ підвищення ефективності використання ресурсів та зменшення втрат врожаю та інших виробничих втрат;
- ✓ можливість вдалого прогнозування та запобігання аварійним ситуаціям через використання алгоритмів машинного навчання та аналізу даних.



## РОЗДІЛ 2.

### АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИБІР ЗАСОБІВ

#### 2.1. Особливості використання інтелектуальних пристроїв для виявлення несправності водяних насосів

Розумне сільське господарство означає використання передових технологій, включаючи великі дані, Інтернет речей, хмарні ресурси, туманні та периферійні обчислення, а також основні інструменти для відстеження, моніторингу та автоматизації сільськогосподарських операцій [42]. Для успішної цифрової трансформації сільського господарства використання інноваційних технологій є ключовим фактором у вирішенні проблем, пов'язаних із застосуванням у сільському господарстві.

Швидкий розвиток електронної промисловості сприяв збільшенню кількості та якості кількох компонентів, таких як блоки мікроконтролерів (MCU), одноплатні комп'ютери, датчики та радіоприймачі, за доступними цінами. Зокрема, нове покоління мікроконтролерів, крім організації типових завдань зондування та дії, може підтримувати складні операції зі зменшеним часом виконання, оскільки вони мають швидші та ефективніші процесори та більше пам'яті. Крім того, передова сучасна радіотехнологія здатна передавати дані на великі відстані з меншим енергоспоживанням.

Відомі досягнення в інтелектуальному сільському господарстві проклали шлях до використання машинного навчання, зокрема з використанням штучних нейронних мереж (ШНМ), у більш широкому асортименті додатків і проектів, водночас маючи перевагу достатньої простоти, щоб її можна було впроваджувати та розгортати навіть не експертам галузі. Такій простоті розгортання сприяє те, що ці алгоритми ML працюють на кінцевих пристроях даної системи; наприклад, на апаратному забезпеченні сенсорного вузла. Вищезазначені пристрої є мініатюрними за розміром і оснащені опціями енергозбереження або збору врожаю, які розширюють їхню роботу, а їх

здатність до обробки та обсяг пам'яті покращуються завдяки згаданим досягненням. У поєднанні ці функції дозволяють локально виконувати алгоритми ML із суттєво мінімізованими витратами енергії та мережі та значною економічною ефективністю порівняно з підходом до типової центральної системи.

Іншою причиною, яка сприяє застосуванню ШНМ на цих мікроконтролерних блоках (MCU), є прогрес у відповідних інструментах навчання, програмування та розгортання на програмних платформах, які демонструють підвищену зручність для користувача. Слід зазначити, що фаза навчання штучних нейронних мереж залишається значно більш вимогливою до обчислень, ніж фаза виконання. Це пояснюється тим, що під час процесу навчання обробляється значна кількість вибіркового даних, щоб підготувати модель і адаптувати її до параметрів проблеми.

Після навчання ШНМ модель можна багаторазово використовувати для дій логічного висновку, не вимагаючи великої обчислювальної потужності, що є оптимальним для MCU з меншими ресурсами. Незважаючи на це, деякі навчені моделі все ще можуть бути важкими для цих мікроконтролерів. На щастя, можна створювати скорочені версії цих більш складних моделей, які сумісні з покращеним поколінням мікроконтролерів [45], використовуючи зручні інструменти, такі як TensorFlow Lite [49], у контексті TinyML [53].

## **2.2. Розробка функціональної схеми запропонованої системи виявлення несправностей водяних насосів**

Враховуючи вище сказане, у нашій роботі пропонується використовувати машинне навчання для розробки моделі класифікації, яка може бути виконана локально на сенсорних вузлах для виявлення характерних випадків несправності типового водяного насоса, який є частиною стандартної водопровідної мережі.

Деякі поширені типи несправностей водяних насосів, які включають проблеми із забором повітря та закупорками на вході чи виході насоса, які виникають з різних причин, від механічної деформації труб до концентрації бруду в них. У зв'язку з цим, щоб досягти успішної діагностики найбільш типових проблем у роботі насосів, були згенеровані характерні сценарії несправності шляхом розміщення трьох клапанів, які втручаються між пластиковими трубками та насосом. Точніше, за допомогою відповідних переналаштувань клапана три найбільш імовірні випадки потенційних сценаріїв несправності були імітовані як зовнішні перешкоди та порівняні з нормальною роботою водяного насоса.

Крім того, для більш точного навчання було включено п'ятий клас даних, що відповідає вимкненню двигуна насоса для імітації випадків шуму. Дані датчиків були записані для всіх цих класів. У свою чергу, набір даних, що складається з п'яти різних класів, був створений і використаний для навчання моделі ML.

Нами запропоновано функціональну схему системи виявлення несправностей водяних насосів (рис. 2.1).

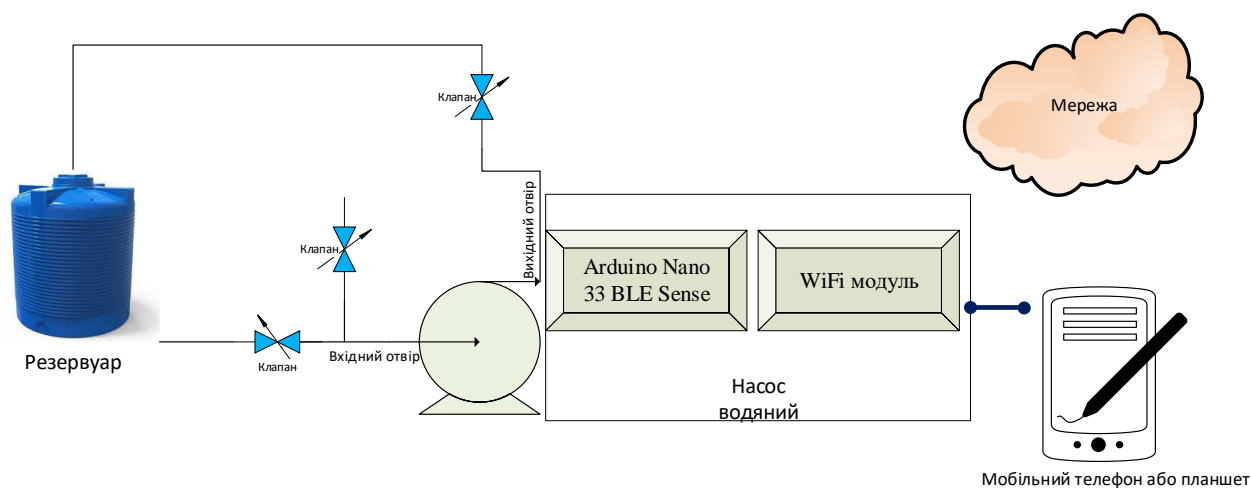


Рисунок 2.1 – Функціональна схема інтелектуальної системи виявлення несправностей водяних насосів

Необхідними апаратними компонентами були відцентровий водяний насос змінного струму, частина якого була вилученим обладнанням, і 50-

літровий резервуар для води, встановлений на спеціальній базі, з'єднаний з водяним насосом за допомогою 3/4 пластикових гідравлічних трубок із пластиковими клапанами, розташованими між трубами. Крім того, цей підхід використовує готові апаратні модулі, які легко знайти, добре задокументовані та економічно ефективні.

### **2.3. Плата Arduino Nano 33 BLE Sense**

Nano 33 BLE Sense (без роз'ємів) – це плата Arduino 3,3 В із підтримкою штучного інтелекту в найменшому доступному розмірі 45x18 мм. Arduino Nano 33 BLE Sense – абсолютно нова плата у відомому форм-факторі, що поставляється з рядом вбудованих датчиків:

- ✓ 9-осьовий інерційний датчик, що робить цю плату ідеальною для переносних пристроїв;
- ✓ датчик вологості та температури для отримання високоточних вимірювань умов навколишнього середовища;
- ✓ барометричний датчик, який дає можливість зробити просту метеостанцію;
- ✓ мікрофон для захоплення та аналізу звуку в реальному часі;
- ✓ датчик жестів, наближення, кольору світла та інтенсивності світла, що дає можливість оцінити освітленість кімнати, а також те, чи хтось рухається близько до плати.

Нами вибрано Arduino Nano 33 BLE Sense (рис. 2.2) – це остання компактна платформа з набором вбудованих датчиків, призначених для створення пристроїв з інтерфейсом Bluetooth, яка працює на короткій відстані. Платформа побудована на модулях U-blox NINA B306.

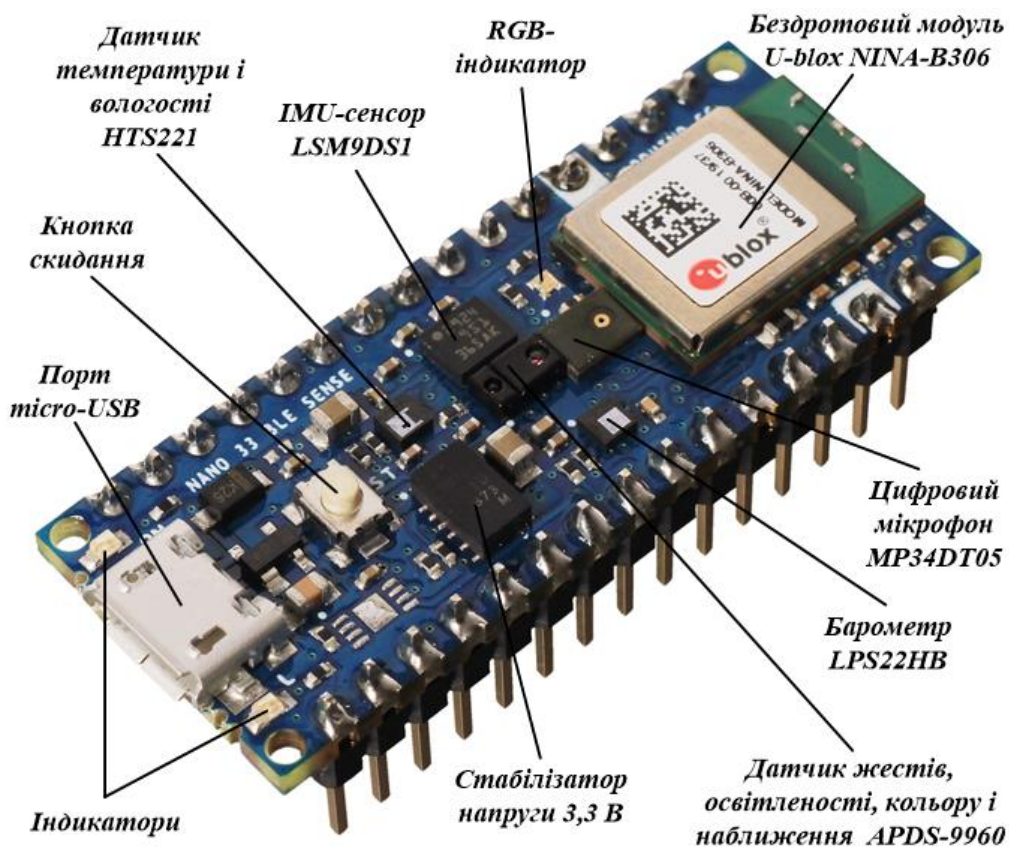


Рисунок 2.2 – Вибрана плата Arduino Nano 33 BLE Sense

Arduino Nano 33 BLE Sense є еволюцією традиційного Arduino Nano, але має набагато потужніший процесор, nRF52840 від Nordic Semiconductors, 32-розрядний процесор ARM® Cortex®-M4, що працює на частоті 64 МГц. Це дозволить вам створювати більші програми, ніж за допомогою Arduino Uno (він має 1 Мб програмної пам'яті, що в 32 рази більше), і з набагато більшою кількістю змінних (RAM у 128 разів більше). Головний процесор включає в себе інші чудові функції, такі як з'єднання Bluetooth® через NFC і режими наднизького енергоспоживання (табл. 2.1).

Насамперед, була використана плата Arduino Nano 33 BLE Sense [18], яка є платою мікроконтролера з потужним процесором, який пропонує можливість розробки більших програм порівняно з Arduino Uno, оскільки вона має флеш-пам'ять, яка в 32 рази більша і оперативної пам'яті в 128 разів більше.

Таблиця 2.1 – Arduino Nano 33 BLE Sense заснований на мікроконтролері nRF52840 [18]

Показник	Значення
Мікроконтролер	nRF52840
Робоча напруга	3,3 В
Вхідна напруга (обмеження)	21В
Постійний струм на контакт введення/виведення	15 мА
Тактова швидкість	64 МГц
Флеш-пам'ять процесора	1 МБ (nRF52840)
SRAM	256 КБ (nRF52840)
EEPROM	немає
Цифрові входи/виходи	14
Піни ШІМ	усі цифрові контакти
UART	1
SPI	1
I2C	1
Аналогові входи	8 (АЦП 12 біт 200 кс. вибірок)
Аналогові виходи	Тільки через ШІМ (без ЦАП)
Зовнішні переривання	усі цифрові контакти
LED_BUILTIN	13
USB	Вбудований у процесор nRF52840
ІДУ	LSM9DS1
Мікрофон	MP34DT05
Жест, світло, близькість	APDS9960
Барометричний тиск	LPS22HB
Температура, вологість	HTS221
Довжина	45 мм
Ширина	18 мм
Вага	5 гр (з заголовками)

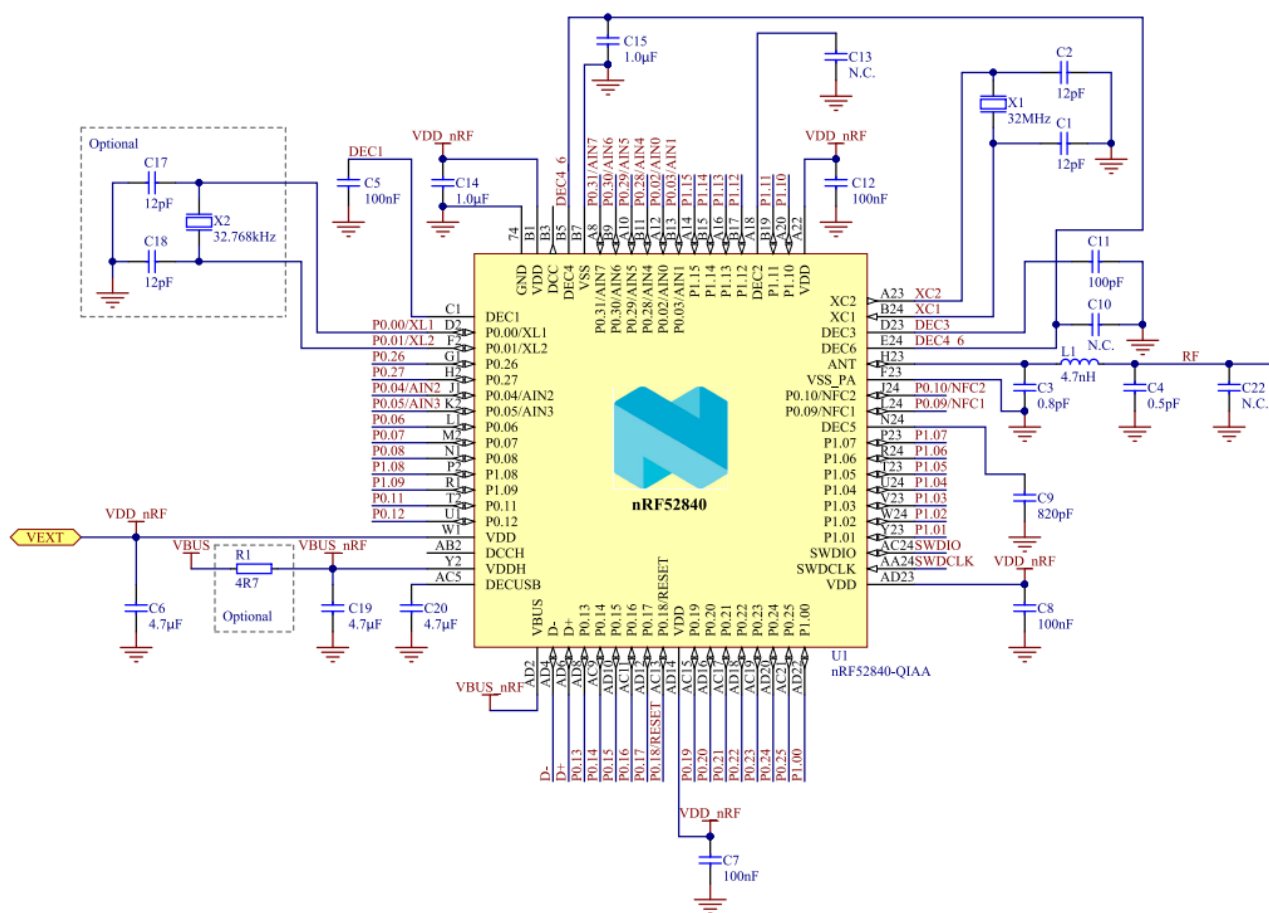


Рисунок 2.3 – Мікроконтролер nRF52840

Розширені функції плати Arduino Nano 33 BLE Sense роблять її придатною для підтримки завдань обробки та пам'яті, необхідних для виконання навченої моделі машинного навчання.

## 2.4. Модуль NodeMCU на основі чіпа ESP8266

NodeMCU (блок мікроконтролера Node M) – це середовище розробки програмного та апаратного забезпечення з відкритим кодом, створене на основі недорогої системи на кристалі (SoC) під назвою ESP8266. ESP8266, розроблений і виготовлений Espressif Systems, містить ключові елементи комп'ютера: центральний процесор, оперативну пам'ять, мережу (Wi-Fi) і

навіть сучасну операційну систему та SDK. Це робить його чудовим вибором для будь-яких проєктів Інтернету речей (IoT).



Рисунок 2.3 – Модуль NodeMCU на основі чіпа ESP8266 [41]

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики NodeMCU

Показник	Значення
Мікроконтролер	ESP-8266 32-біт
Модель NodeMCU	Amica
Розмір NodeMCU	49 мм x 26 мм
Розмір несучої плати	n/a
Відстань між шпильками	0,9" (22,86 мм)
Така швидкість	80 МГц
USB на наступний порт	CP2102
Роз'єм USB	Micro USB
Робоча напруга	3,3 В
Вхідна напруга	4,5 В-10 В
Флеш-пам'ять/SRAM	4 МБ / 64 КБ
Цифрові контакти введення/виведення	11
Аналогові входи	1
Діапазон АЦП	0-3,3 В
UART/SPI/I2C	1/1/1
Вбудований WiFi	802.11 b/g/n
Температурний елемент	-40°C...125°C



Однак, як чіп, ESP8266 також важко отримати доступ і використовувати. Повинні припаяти дроти з відповідною аналоговою напругою до його контактів для найпростіших завдань, таких як увімкнення живлення або надсилання натискання клавіші на «комп'ютер» на мікросхемі. Також слід запрограмувати його в низькорівневих машинних інструкціях, які можуть бути інтерпретовані апаратним забезпеченням мікросхеми. Цей рівень інтеграції не є проблемою для використання ESP8266 як мікросхеми вбудованого контролера в електроніці масового виробництва.

NodeMCU доступний у різних конфігураціях. Спільним для всіх є базове ядро ESP8266. Конструкції, засновані на архітектурі, зберегли стандартне 30-контактне розташування. У деяких конструкціях використовується більш поширена вузька (0,9 дюйма) площа, тоді як в інших використовується широка (1,1 дюйма) площа – важливе зауваження, про яке слід пам'ятати.

Найпоширенішими моделями NodeMCU є Amica (на основі стандартної вузької відстані між контактами) і LoLin, яка має ширшу відстань між контактами та більшу плату. Варіант бази ESP8266 з відкритим кодом дозволяє ринку постійно розробляти нові варіанти NodeMCU.

Придатність плати Arduino Nano 33 BLE Sense для підтримки подібних завдань була вказана іншими проектами інтелекту на пристрої [46]. На додаток до мікроконтролера Arduino використовувався модуль NodeMCU на основі чіпа ESP8266 [27], який пропонує різноманітні варіанти підключення до мережі WiFi.

## **2.4. Програмування пристрою Arduino Nano 33 BLE Sense**

Нами використано для програмування Arduino Cloud [17]. Arduino Cloud надає програми, веб-сервіси та ресурси для розробки проектів Arduino з широким діапазоном пристроїв.

Пристрій Arduino Nano 33 BLE Sense запрограмували на такі функції:

- ✓ для запису та передачі даних датчиків, головним чином даних руху, через вбудовані датчики (наприклад, акселерометр);
- ✓ пересилати ці дані за допомогою більш потужного комп'ютера в хмару, щоб навчити відповідну модель нейронної мережі;
- ✓ для виконання урізаної моделі нейронної мережі, тобто для визначення робочого стану насоса та передачі свого рішення в мережу.

Код для Arduino Nano 33 BLE Sense, який записує дані акселерометра та передає їх через вбудований BLE (Bluetooth Low Energy), подано у додатку А.

Для цього нами встановлено бібліотеку ArduinoBLE та Arduino\_LSM9DS1 через Arduino IDE перед використанням цього коду. Представлений код ініціалізує підключення до датчиків IMU (Inertial Measurement Unit), включаючи акселерометр. Ініціалізує BLE та створює сервіс та характеристику для передачі даних руху. Очікує з'єднання з центральним пристроєм (наприклад, смартфоном). Отримує дані акселерометра та відправляє їх центральному пристрою через BLE. Повторює цей процес, доки з'єднання активне.

## **2.5. Створення моделі штучної нейронної мережі**

Для частини машинного навчання необхідне навчання та включення остаточної моделі штучної нейронної мережі (ANM) [21] у програмне забезпечення, що працює на мікроконтролері (рис. 2.4).

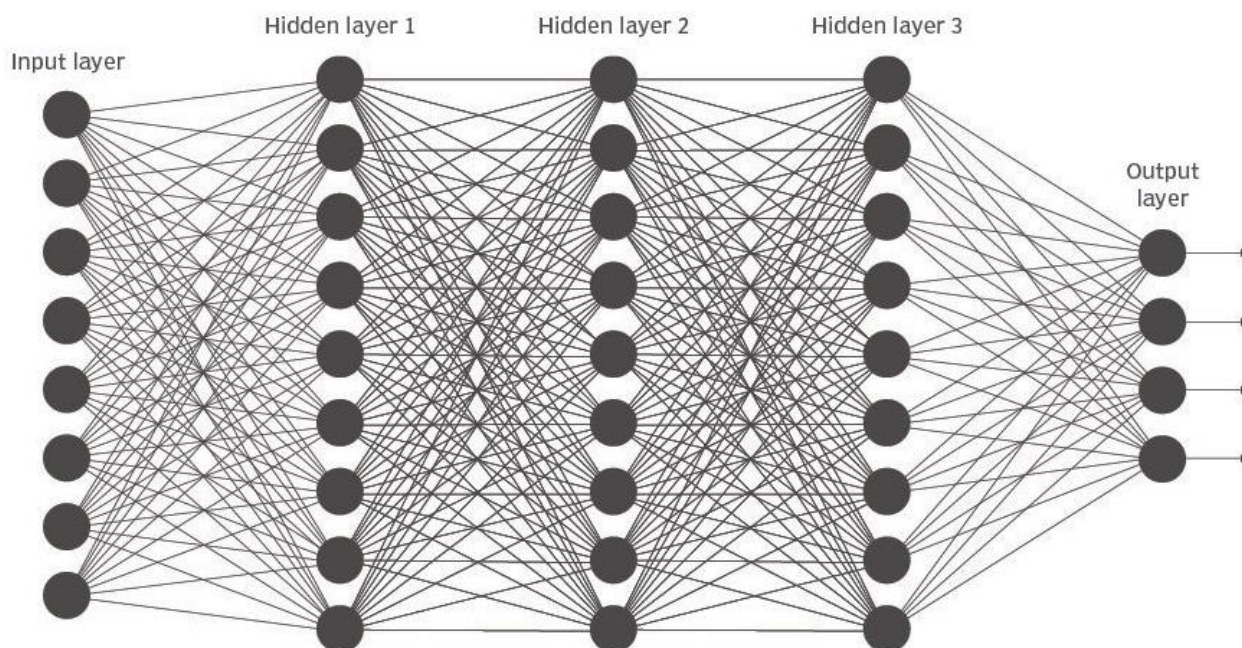


Рисунок 2.4 – Схема штучної нейронної мережі (АНМ)

Зокрема, ШНМ базується на роботі нейронів людського мозку. Ця структура має один вхідний рівень і один або кілька прихованих шарів, які взаємопов'язані, а також вихідний рівень для надання результатів.

Простою та ефективною платформою розробки для створення моделей машинного навчання (тобто для навчання та вилучення або компіляції даних) на периферійних пристроях є хмарне середовище Edge Impulse [26]. Ця платформа підтримує велику кількість плат розробки, включаючи блок Arduino Nano 33 BLE Sense. Це дозволило миттєво записати, завантажити та позначити зразки, необхідні для набору даних, і безпосереднє розгортання програмного забезпечення остаточної моделі. Подальші вимоги були вирішені через середовище програмування Arduino IDE [20].

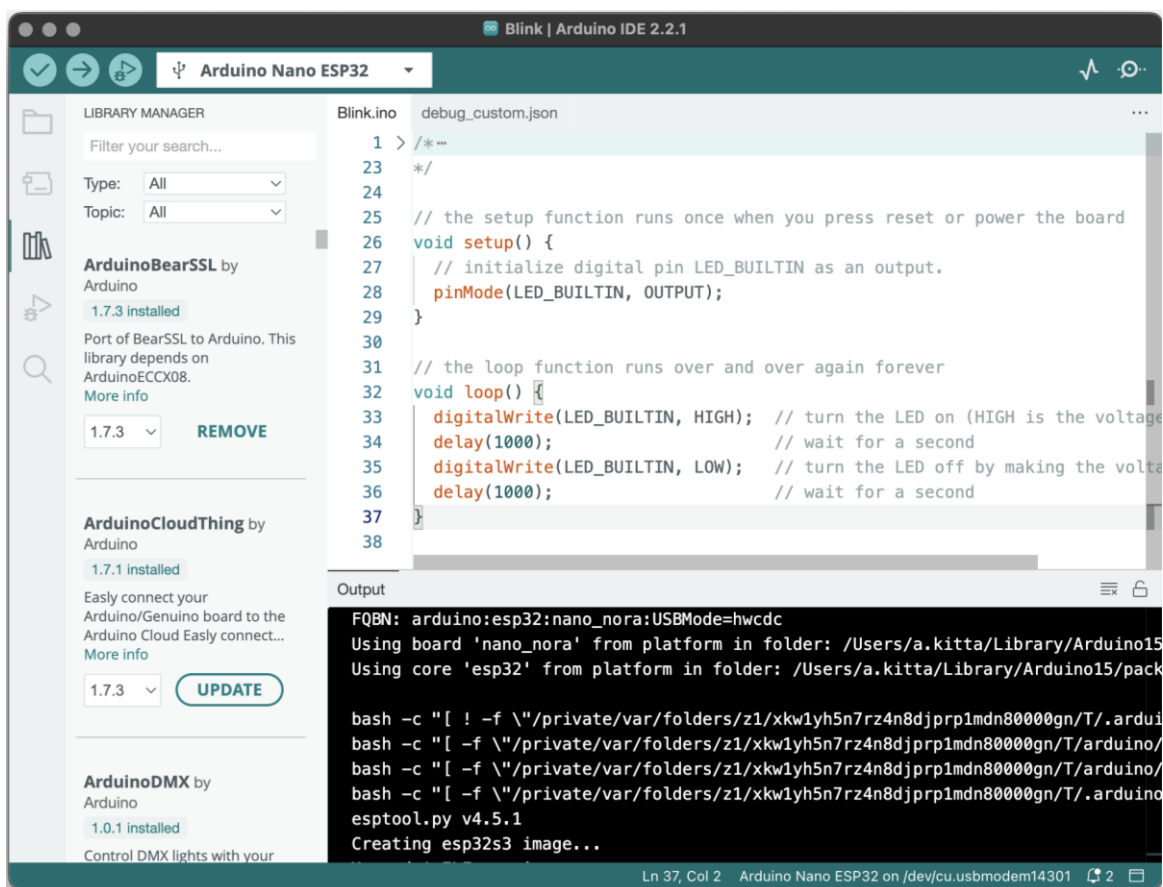


Рисунок 2.5 – Робоче вікно Arduino IDE 2.x

Arduino IDE 2.x є серйозно переписаним, не має спільного коду з IDE 1.x. Він базується на платформі Theia IDE і створений за допомогою Electron. Операції серверної частини, такі як компіляція та завантаження, вивантажуються в екземпляр `arduino-cli`, що працює в режимі демо. Ця нова IDE була розроблена з метою збереження того самого інтерфейсу та досвіду користувача попередньої основної версії, щоб забезпечити безпроблемне оновлення.

Також було розроблено мережеве середовище моніторингу для інформування користувача про умови роботи одного або кількох насосів. Наявність поблизу вузла зливу або шлюзу для збору інформації від вузлів датчиків, особливо у випадках, коли потрібно контролювати більше одного водяного насоса, полегшує підключення до пристрою кінцевого користувача (наприклад, смартфона, планшета або ноутбука), а також робить інформацію про рішення про класифікацію доступною для хмари для полегшення доступу

та подальшої візуалізації чи обробки. На рисунку 2.1 подано функціональну схему запропонованої системи виявлення несправності водяного насоса.

Для створення моделі виявлення несправностей водяних насосів на базі блоку Arduino Nano 33 BLE Sense у середовищі Edge Impulse, слід скористатися інструментами цієї платформи. Загальний опис цього процесу представлено на рис. 2.6.

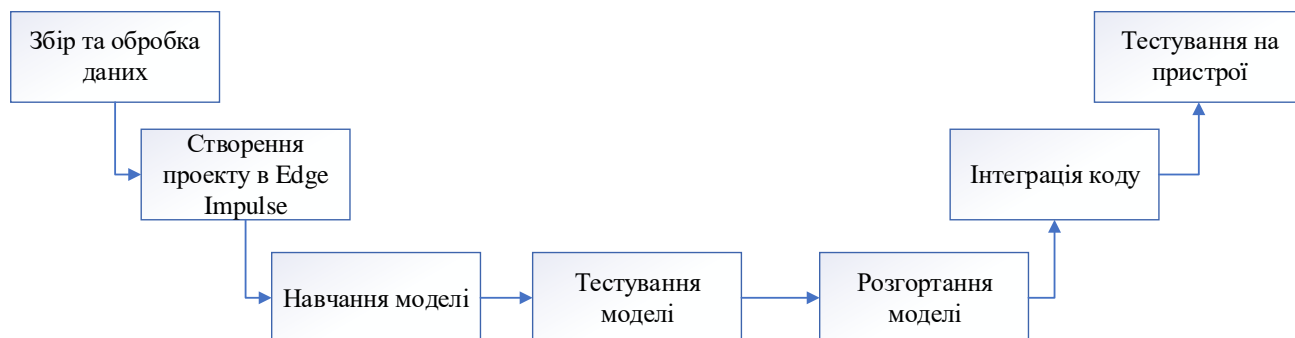


Рисунок 2.6 – Етапи процесу створення моделі ШНМ

Насамперед слід виконати збір та обробку даних. Для потрібно зібрати дані з датчиків водяних насосів, таких як прискорення чи вібрація. Ці дані слід обробити та підготувати для подальшого навчання.

Після цього виконується створення проекту в Edge Impulse. Для цього зареєструвалися на веб-сайті Edge Impulse та створили новий проект. Додали зібрані дані до проекту.

Для навчання моделі використовували інструменти Edge Impulse, що дають можливість створити ШНМ. Вибрано алгоритм та виконано налаштування, які найкраще підходять для нашого завдання.

Після створення моделі виконується її тестування. Перевіряється робота навченої моделі на тестових даних. Це дає можливість впевнитися, що модель ефективно виявляє несправності водяних насосів.

Наступний крок передбачає розгортання моделі. Для цього перейшли до вкладки «Deployment» (Розгортання) та обрали «Arduino library» (Бібліотека Arduino). Згенерували код для вашого Arduino Nano 33 BLE Sense.

Після цього виконується інтеграція коду. Вставляємо згенерований код у наш проєкт у Arduino IDE або Arduino Web Editor. Для цього додано необхідні бібліотеки та налаштування.

У подальшому виконується тестування на пристрої. Завантажується код на наш Arduino Nano 33 BLE Sense і проводиться тестування роботи моделі в реальних умовах.

Нами подано загальний опис процесу створення моделі виявлення несправностей водяних насосів на базі Arduino Nano 33 BLE Sense у середовищі Edge Impulse. Кожен крок може вимагати деякої додаткової конфігурації та налаштувань в залежності від завдання та даних.

Слід зазначити, що окрім продуктивності моделі ШНМ, важливою проблемою для вивчення була можливість застосування задовільного рішення з мінімальними витратами та складністю, з використанням методів машинного навчання на пристрої, із значно меншим навантаженням на мережу та досягненням кращі відстані зв'язку та менше енергоспоживання.

## РОЗДІЛ 3.

### РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ ВОДЯНИХ НАСОСІВ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ НА ОСНОВІ ARDUINO NANO 33 BLE SENSE

#### 3.1. Опис конструкції інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств

Інтелектуальний пристрій для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств працює у системі, яка була закритого типу, що означає, що вода тече з 50-літрового резервуара до водяного насоса і повертається в резервуар.



Рисунок 3.1 – Схема конструкції інтелектуального пристрою для виявлення  
несправності водяних насосів фермерських господарств

Таким чином, вхідний і вихідний отвір водяного насоса були з'єднані з резервуаром для води пластиковими трубками з проміжними клапанами для контролю потоку води в кожній трубці. Крім клапана, ще одна трубка була прикріплена перпендикулярно до трубки, підключеної до входу насоса. Ця трубка також була оснащена клапаном; однак інший кінець трубки залишили

відкритим, щоб забезпечити приплив повітря, залежно від поточного стану клапана.

Блок Arduino Nano 33 BLE Sense разом із вбудованими датчиками (наприклад, мікрофоном, акселерометром) був закріплений збоку від двигуна водяного насоса, щоб розпізнавати різні шаблони вібрації для кожного класу даних.

Для збору даних необхідно підключити Arduino Nano до комп'ютера через USB-порт, щоб легко записувати та завантажувати зразки до зазначеного проекту Edge Impulse. Те саме підключення можна використовувати для компіляції та завантаження навченої моделі в Arduino Nano BLE і для моніторингу продуктивності моделі.

Нарешті, Arduino Nano BLE було підключено до блоку NodeMCU, щоб забезпечити доступ до мережі WiFi.

На рисунку 3.1 представлені деталі впровадження запропонованої системи, включаючи відцентровий водяний насос і три проміжні пластикові клапани в трубопроводі.

### **3.2. Налаштування та підготовка інтелектуального пристрою**

Як згадувалося вище, модуль Arduino Nano 33 BLE Sense повністю сумісний з платформою Edge Impulse, і вони можуть легко співпрацювати, якщо пристрій налаштовано в Edge Impulse. Щоб успішно підключити плату, було завантажено Arduino CLI та останню версію прошивки Edge Impulse. Плата була підключена до комп'ютера через порт USB, і кнопка скидання була натиснута двічі поспіль для запуску завантажувача.

Потім було відкрито флеш-скрипт для відповідної операційної системи (в даному випадку `flash_windows.bat`), щоб автоматично прошити мікропрограму на платі, без залучення інтерфейсу користувача, після чого, нарешті, пристрій був готовий до підключення до платформи Edge Impulse.



Щоб легко передавати дані з вбудованого акселерометра пристрою Arduino Nano 33 BLE Sense на платформу Edge Impulse через послідовне з'єднання, інструмент пересилання даних використовувався через плату Raspberry Pi 4 Model B як допоміжний комп'ютерний блок.

### 3.3. Навчання нейронної мережі

Основні кроки процесу навчання машинного навчання зображено на рис. 2.7. Першим кроком у навчанні моделі нейронної мережі є отримання достатньої кількості даних для кожного окремого класу. Цей набір даних складався з п'яти класів: один для даних нормальної роботи, три для даних про змодельовану несправність і останній для даних, які вважаються шумом.

Тривалість роботи одного зразка п'ять хвилин або більше є достатньою для нашої роботи, оскільки мета була переважно експериментальною. Потім зібрані дані потрібно розділити між навчальним набором даних, який використовується для навчання нейронної мережі, і тестовим набором даних, який зарезервовано для перевірки ефективності моделі.

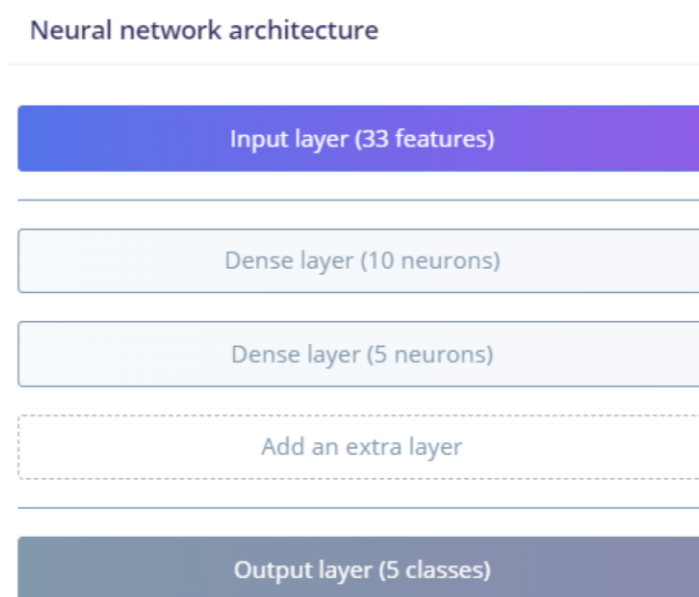


Рисунок 3.2 – Структура моделі ШНМ

Оскільки всі зібрані дані автоматично завантажуються в набір для навчання, розробники платформи пропонують розподілити близько 20% даних для набору даних для тестування. Однак відсоток може дещо відрізнятись, оскільки загальна кількість зібраних зразків може не поділятися таким чином, як це було нашої роботі, тому розподіл було виконано в діапазоні 78–22%, що не вплинуло на продуктивність або ефективність моделі.

Після збору та розділення необхідних даних наступним кроком є розробка та навчання моделі, що вимагає додавання блоку обробки, який модифікує дані, та блоку навчання, який, по суті, дозволяє вибрати конкретну нейронну мережу для навчання.

Дані в основному збиралися за допомогою вбудованого акселерометра пристрою Arduino Nano, тому потрібно було вибрати правильний блок для обробки таких даних, яким був блок «спектрального аналізу», оскільки він важливий для аналізу повторюваних рухів, таких як дані з акселерометри та вилучення характеристик частоти та потужності сигналу в часі.

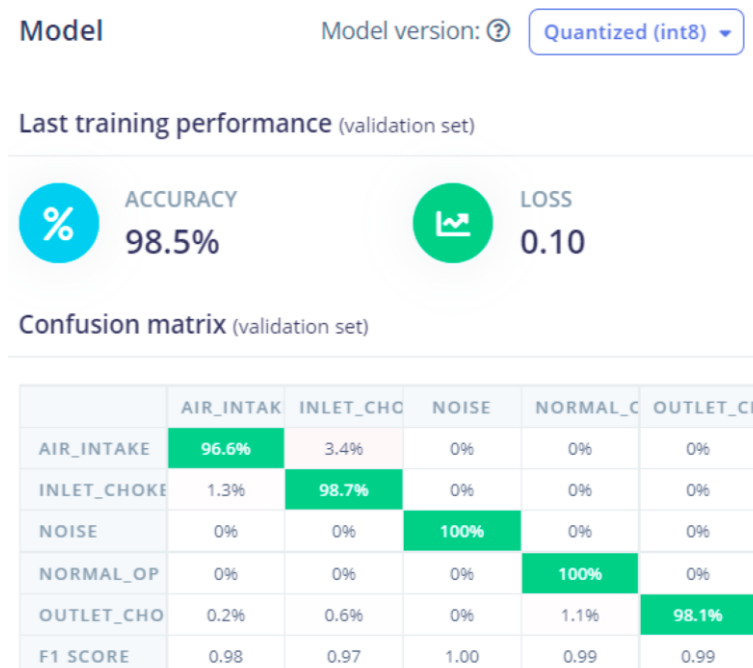


Рисунок 3.3 – Результати визначення точності моделі ШНМ за допомогою платформи Edge Impulse

Для навчального блоку була використана бібліотека класифікаційної нейронної мережі, реалізована Keras, яка може вивчати шаблони з заданих даних і застосовувати їх до нових даних. Така бібліотека підходить для категоризації рухів або розпізнавання аудіо, причому перше є основною метою цього експерименту. Крім того, розмір вікна було встановлено на 2000 мс (тобто 2 с) відповідно до профілів, поданих у систему навчання, і з урахуванням періоду явища. За аналогічною схемою збільшення вікна було встановлено на 80 мс, а частота – на 100 Гц.

Блок обробки згенерував 33 функції, які були імпортовані як вхідний рівень процесу навчання. Проміжні шари включали 10 і 5 нейронів відповідно, кількість циклів навчання було встановлено 30, а вихідний шар містив 5 класів. Після процесу навчання Edge Impulse зберігає модель із найкращою продуктивністю у версії Quantized (int8), яка підходить для апаратної платформи Arduino. Edge Impulse дає можливість завантажити модель як код (бібліотеку та ескізи) для Arduino, доступний через середовище Arduino IDE, і запустити її в режимі реального часу.

### **3.4. Інтеграція моделі на пристрої та механізми зв'язку**

Код, згенерований платформою Edge Impulse, у формі загальної бібліотеки Arduino, надає настроювані приклади (ескізи) для середовища Arduino IDE, серед підтримуваних моделей є плата Arduino Nano 33 BLE Sense, що робить її сумісною зі згенерованими параметри моделі.

Вибір опції «Бібліотека Arduino» надає свободу в поєднанні моделі машинного навчання з додатковими алгоритмами поведінки, які необхідні для виконання мікроконтролером хостингу. Подальше налаштування та остаточний процес перенесення на плату мікроконтролера були можливі через середовище Arduino IDE. На рис. 3.4 зображено екземпляр середовища під час процесу програмування.

```

1 #include <ArduinoBLE.h>
2 #include <Arduino_LSM9DS1.h>
3
4 BLEService motionService("180C"); // Створено BLE сервіс для передачі даних руку
5 BLECharacteristic motionCharacteristic("2A56", BLERead | BLENotify, 6); // Створено BLE характеристики для даних руку
6
7 void setup() {
8   Serial.begin(9600);
9   while (!Serial);
10
11   if (!IMU.begin()) {
12     Serial.println("Failed to initialize IMU!");
13     while (1);
14   }
15
16   if (!BLE.begin()) {
17     Serial.println("Failed to initialize BLE!");
18     while (1);
19   }
20
21   BLE.setLocalName("MotionSensor"); // Це я пристрій для BLE
22   BLE.setAdvertisedService(motionService); // Повідомлено BLE про сервіс даних руку

```

Рисунок 3.4 – Фрагмент коду програмування Arduino Nano 33 BLE Sense для запису та передачі даних датчиків

Були зроблені додаткові заходи для того, щоб прогнозований стан насоса можна було бачити користувачам у режимі реального часу. Очевидним варіантом було використання USB-інтерфейсу блоку Arduino Nano 33 BLE Sense і термінальної програми. Наприклад компонента послідовного моніторингу середовища Arduino IDE, що працює на комп'ютері. Цей параметр підходить для програмування та налагодження, але має обмежене практичне значення для користувачів, які віддають перевагу бездротовому доступу до інформації, що генерується.

Блок Arduino Nano 33 BLE Sense забезпечує великий набір різноманітних датчиків (тобто, акустичних, освітленості, кольору, температури, вологості, барометричних, руху та магнітних), які роблять її ідеальним для дослідження прототипів, але він не має радіо WiFi модуля. Оскільки останнє є стандартом для повсякденного радіозв'язку, довелося використовувати другу плату на основі чіпа ESP8266, а саме блок NodeMCU. Точніше, модуль NodeMCU з підтримкою WiFi був підключений до Arduino Nano 33 BLE Sense через один із послідовних портів мікроконтролера. Лише послідовний контакт TX Arduino потрібно було з'єднати з контактом RX NodeMCU, а також контактом загальної землі. Якщо обидва пристрої не використовують свої роз'єми USB для зв'язку з комп'ютером (що часто робилося під час експериментів з метою

налагодження), контакти джерела живлення Arduino Nano 33 BLE Sense і NodeMCU також повинні бути підключені, щоб обидва пристроїв для роботи за умови, що один з них має належне живлення. Програмування NodeMCU також було виконано за допомогою програмного забезпечення Arduino IDE. Деталі взаємозв'язку між Arduino Nano 33 BLE Sense і платою NodeMCU під час випробувань насоса показано на рис. 3.5.

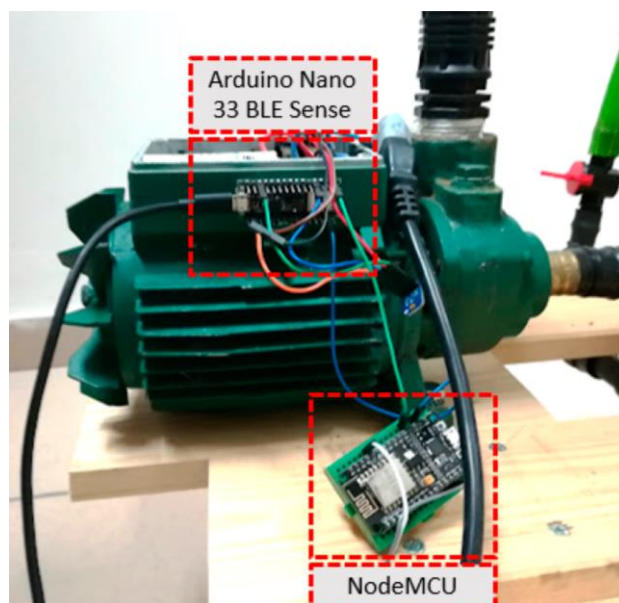


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд інтелектуального рішення на пристрої, що використовує модуль Arduino Nano 33 BLE Sense і плату NodeMCU

Поєднання реалізації навченої моделі ШНМ із простими та більш звичайними методами програмування підвищило точність прогнозування. Точніше, статистичну обробку даних було застосовано до оригінальних рішень ШНМ після їх надходження з блоку Arduino Nano на плату NodeMCU. Остання панель обчислювала найбільш імовірну категорію протягом фіксованого періоду послідовних вибірок, перш ніж представляти результат, без зміни початкової моделі нейронної мережі, які навчали. Потім кінцеві результати були доступні користувачеві через параметри підключення TCP/IP на платі

NodeMCU. На платі NodeMCU також реалізовано опцію придушення послідовних сповіщень одного типу.

Блок NodeMCU, що використовує бібліотеку ESP8266WiFi [50] для середовища Arduino IDE, спочатку був налаштований як веб-сервер, що містить просту HTML-сторінку з динамічним вмістом, що відповідає умовам роботи водяного насоса.

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1. Аналіз умов праці та шкідливих виробничих чинників

В цьому розділі розглядається аналіз умов праці та пожежна безпека на робочому місці інженера-проектувальника інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 BLE Sense. Згідно ГОСТу 12.0.003-74 у якому визначені фізичні небезпечні та шкідливі виробничі чинники було виділені ті чинники які присутні на робочому місці інженера-проектувальника інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів:

- підвищена чи занижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- підвищена напруженість електричного поля;
- підвищена напруженість магнітного поля;
- відсутність або нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла;
- знижена контрастність.

В наш час технології безперервно і стрімко розвиваються і професії пов'язані з ІТ стали дуже поширеними. Серед них багато сидячої роботи за комп'ютером. Тому важливо забезпечити безпечні умови праці для робітників, що працюють увесь, або майже увесь час сидячи.

Безпечні та комфортні умови праці забезпечують продуктивну роботу та якісне виконання працівниками конкретної задачі. Безпека на робочому місці потрібна для того щоб запобігти травмам та хворобам працівників на робочих місцях, що в свою чергу також дає змогу підприємству працювати якісно.

## 4.2. Організація робочого місця під час створення інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів

Під час створення інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 BLE Sense важливим елементом є ергономіка робочого місця, що являє собою науку про зручність та організацію робочого простору для ефективної та комфортної праці, опираючись на психофізичні особливості організму людини (рис. 4.1).

Дотримання норм, які відзначені на рис. 4.1 знижує втомленість працівника, збільшує ефективність бізнес-процесу та зберігає здоров'я людей. Ергономіка забезпечує зниження навантаження на тіло людини, а нам відомо, що чим більше людина втомлюється, тим гіршою буде її продуктивність, що не вигідно ні працівнику, ні компанії в якій вона працює. Робоче місце повинно бути організоване відповідно стандартів, методичних вказівок та технічних вимог.

Не дивлячись на те, що робота за комп'ютером може здатися цілком безпечною, на відміну від підприємств з більш підвищеною небезпекою, в ній теж є свої нюанси, яких потрібно дотримуватись.



Рис. 4.1. Нормовані значення організації робочого місця під час створення інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів



Стандарт висоти письмового та комп'ютерного стола 68-80 см, при такій висоті у людини є достатньо міста для ніг. Монітор розміщується на відстані 60-70 см, клавіатура на 10-15 см і вона повинна дозволяти повністю розмістити лікті на столі. Відстань від підлоги до верхнього краю клавіатури 0,7-0,8 м. Відстань від підлоги до центру екрана 0,8-1,9 м.

Якщо недостатньо простору для розміщення усіх необхідних для роботи інструментів, це можна компенсувати розміщенням поряд тумб, стелажу та/або полиць. Усе це повинно бути розташовано по принципу «усе під рукою», що дозволить витратити менше енергії та направити її на виконання робочого плану.

Якщо людина проводить за ПК більш ніж 6 годин на добу, є ризик розвитку захворювання опорної системи. Для того щоб мінімізувати ризики потрібно обладнати робоче місце спеціальним ортопедичним кріслом для роботи за комп'ютером. Воно оснащено спеціальним валиком у нижній частині спинки, який забезпечує підтримку попереку та повторює анатомічну будову тіла. Спинка крісла у робочому положенні фіксується під прямим кутом 90-95°. Кут між спиною та спинкою крісла 10°-30°. Відстань від підлоги до сидіння крісла 0,375-0,5 м. Кут зору 15°-25°. Інформація про ергономіку описана у ГОСТі 12.2.032-78.

### **4.3. Створення мікроклімату на робочому місці**

Для приміщення, де проектується інтелектуальний пристрій для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 BLE Sense, існують певні вимоги до вологості, температури та рівню пилу. Температура повинна бути 21...25 °С, відносна вологість – 40...60%, рівень аероіонів – от 400...600 до 50 000 (оптимальний – 1500...5000). Це є оптимальними умовами для комфортного теплового балансу

температури тіла людини. На терморегуляцію організму людини також впливає вологість повітря.

Занадто низька вологість, яка менша 20%, викликає пересихання слизових оболонок, а саме дихальних шляхів та очей, а вища 85% ускладнює терморегуляцію. Також дуже важливою є оптимальна вологість, якщо вона вища за норму, то слабкішим стає електростатичне та електромагнітне поле, рівень випромінювання яких в приміщеннях з комп'ютером завжди високий.

Що стосується пилу в приміщеннях, цей критерій є не менш важливим, тому що організм людини погано реагує на велику запиленість. Пил в приміщенні відрізняється від природнього, він містить частки шкіри людини, витратних матеріалів, а також бактерії та віруси. Такий пил може визвати як алергічну реакцію, так і захворювання дихальних шляхів.

Проблемою офісів з комп'ютерами є те, що через електромагнітне випромінювання пил не осідає на поверхні, він електризується від монітору та висить у повітрі, тому потрапляє на слизові оболонки людини та в легені. Через це вологе прибирання в офісі з ПК повинно проводитися від 3х разів на тиждень.

Також приміщення повинно провітрюватися. Усі заходи безпеки стосовно робочих місць описані у обов'язкових санітарно-епідеміологічних правилах та нормах – СанПіН 2.2.2/2.4.1340-30 «Гігієнічні вимоги до персональних електронно-обчислювальних машин та організації роботи».

Чи не найбільш важливим є освітлення приміщення та безпосередньо робочого місця, бо більшу частину інформації людина отримує через органи зору, від ступеня втоми очей залежить настрої та самопочуття людини.

Насамперед в приміщенні повинно бути штучне та природне освітлення. Для працівника робоче місце за комп'ютером повинно бути не менше 6 м<sup>2</sup>, а об'єм – більше 20 м<sup>3</sup>. Має значення й обробка приміщення, а саме її коефіцієнт відображення. Нормою для стін є 0,5-0,6, для стелі 0,7-0,8, для підлоги 0,3-0,5. Для цього застосовують дифузно-відбивні комплектуючі.

Орієнтуватися тільки на природне освітлення забороняється, але воно є оптимальним, бо більш сприятливе для зору людини. Робоче місце необхідно розмішувати біля вікна. Штучне освітлення використовують, коли природнього недостатньо. Воно поділяється на загальне, яке використовує систему освітлення стелі, робоче – освітлення на робочому місці здійснюється за допомогою настінних, настільних світильників, та тих, що ставляться на підлогу. Існує документація ДБН В.2.528:20018, в якій прописані норми та нормативи, які враховуються при організації освітлення при роботі з ПК. Для офісів спільного призначення з використанням комп'ютеру норма освітленості згідно з ДБН 300-500 лк.

Щоб отримати оптимальне освітлення робочого місця, а саме коефіцієнта освітленості потрібно потужність потоку світла розділити на площу. Яскравість освітлення поверхонь, які знаходяться у полі зору повинна бути до 200 кд/м<sup>2</sup>. Яскравість відблисків на екрані монітора не повинна перевищувати 40 кд/м<sup>2</sup>.

#### **4.4. Зниження рівня шуму та забезпечення електробезпеки на робочому місці**

Рівень шуму на робочому місці з комп'ютером не повинен перевищувати норм зазначених у СанПіН 2.2.4/2.1.8.562-96. Він складає не більше ніж 50 дБА. Знизити рівень шуму в приміщенні можна за допомогою звукопоглинаючих матеріалів з максимальним коефіцієнтом поглинання звуку в області частот 638000 Гц для обробки стін та стелі робочого приміщення. Джерелами шуму виступають:

- звуки, які доносяться з сусідніх приміщень або вулиці;
  - технічні звуки. виникають у процесі функціонування обладнання.
- щоб мінімізувати шум від нього потрібно використовувати більш якісні пристрої.

➤ шум джерелом якого є людина. для зменшення шуму в приміщенні існують правила, які встановлює підприємство, порушуючи їх співробітник отримує попередження чи штраф.

На робочому місці працівника розміщуються монітор, клавіатура та системний блок. Коли дисплей включений створюється висока напруга на електронно-променевої трубки в декілька кіловат. Забороняється працювати за комп'ютером, якщо одяг або руки вологі, а також протирати його увімкненому стані.

Потрібно завжди слідкувати за цілісністю проводки, відсутності пошкоджень та наявності заземлення приєднаного фільтра. В процесі роботи на корпусах можуть виникати струми статичної електрики, які при доторканні можуть призвести до розрядів. Вони хоч і не становлять небезпеки для людини, але можуть призвести до поломки комп'ютер та пристроїв Arduino Nano 33 BLE Sense.

#### **4.5. Пожежна безпека на робочому місці**

Пожежна безпека – комплекс заходів направлених на попередження виникнення випадкової або навмисної пожежі, обмеження та усунення його, якщо він виник та мінімізація наслідків цього явища. Для досягнення потрібного рівня безпеки про роботі з комп'ютером, у виробничому приміщенні повинні бути аптечки першої медичної допомоги, системи автоматичної пожежної сигналізації і вогнегасники. Якщо в приміщенні працюють багато комп'ютерів, там повинен бути службовий вимикач, що дозволяє в разі необхідності вимкнути усе живлення кімнати. Пожежна безпека забезпечується пожежною профілактикою та активним пожежним захистом.

Переважає більшість людей гине через токсичність продуктів горіння, а саме отруєнням чадним газом, він більш інтенсивне реагує з гемоглобіном ніж кисень і у людини виникає кисневе голодування та порушення координації

рухів. Оксид вуглецю має велику концентрацію в продуктах горіння, тому й створює підвищену небезпеку. Основним токсичними продуктами горіння є оксид сірки та вуглецю, газоподібні кислоти, а саме синильна та соляна, аміак, альдегіди альфатичні. Чадний газ при концентрації 8-10% приводить до смерті через декілька хвилин.

Температура, яка перевищує 100 °С під час пожежі призводить до втрати свідомості людини і подальше загибелі через декілька хвилин. Така температура може викликати опіки шкіри. Небезпечною температурою вважається від 55 °С. До того ж вона викликає опіки другого ступеня при тривалості впливу 20 с, температура 70 °С завдає шкоди за 1 с.

Для забезпечення пожежної безпеки потрібно проводити бесіди з працівниками стосовно правил пожежної безпеки та не допускати дій, які можуть стати причиною пожежі. Також потрібне встановлення планів евакуації персоналу, технічне обслуговування вогнегасників. Зазвичай причинами пожежі на підприємствах стають електроприлади, куріння в невстановлених місцях, використання легкозаймистих речовин, порушення технологій, порушення правил використання електроприладів, закриті вентиляційний отвір в електроапаратурі та інше.

Потрібно слідкувати за чистотою приміщення. Сміття та горючі відходи потрібно регулярно утилізувати у спеціально виділене для цього місце.

Евакуаційні виходи, коридори, двері, сходини повинні бути порожніми, нічим не заставлені. Мебель та дроти не повинна бути перешкодою для евакуації людей в разі пожежі. Розташування електричних дротів повинно бути таким щоб вони не пошкоджувались і виключити ризик ураження робітників електричним струмом. По закінченню роботи потрібно вимкнути усі електроприлади та перевірити приміщення.

Для гасіння пожежі у приміщеннях використовують вогнегасники, які призначені для початкової стадії розвитку пожежі. Безпосередньо у приміщеннях з комп'ютерами використовують вогнегасник вуглекислотний ОУ-5, який призначений для гасіння різноманітних матеріалів, електричних

установок, які знаходяться під напругою та техніки. Хід дій такий, що при пожежі потрібно піднести вогнегасник якомога ближче до вогню, направити розтруб у вогнище, зірвати пломбу, далі відкрити вентиль, натиснути на пусковий важіль, направити газ на вогонь. При цьому розтруб не можна тримати рукою під час його роботи, так як він має дуже низку температуру. Також використовують порошкові вогнегасники ОП-5.

У ДСТУ 3675-98 йдеться про пожежну техніку, вогнегасники переносні, загальні технічні вимоги та методи випробовування. Вогнегасники потрібно грамотно розташовувати на підприємстві згідно норм та правил, встановити потрібну кількість та їх положення. Вогнегасники повинні бути на кожному поверсі у кількості не менше ніж 2, у кожного повинен бути сертифікат. Вони повинні бути легкодоступними та розташовуватися у виділених місцях близько до передбачуваного місця пожежі, а також біля евакуаційних шляхів та виходів з приміщення. Вогнегасник повинен бути у робочому стані з запломбованим запірно-пусковим пристроєм. Маса вогнегасника не повинна перевищувати 20 кг. Розташування від підлоги не більше ніж півтора метри до верхньої точки, якщо маса вогнегасника менша ніж 15 кг та один метри, якщо більша. Також можна встановити вогнегасник на підставці та на підлогу з надійною фіксацією від падіння. При цьому вогнегасник не повинен заважати пересуванню працівників.

Щоб забезпечити якісний пожежний захист необхідно знати принцип припинення горіння.

Однією з важливих задач пожежної безпеки є забезпечення достатньої міцності будівельної конструкції та захисту приміщень від руйнувань в умовах дії високої температури при пожежі. Приміщення проектувальника повинні бути першого та другого ступеня вогнестійкості, через свою велику вартість та категорію пожежної небезпеки.

## РОЗДІЛ 5.

### ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ ВОДЯНИХ НАСОСІВ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ НА ОСНОВІ ARDUINO NANO 33 BLE SENSE

Інтелектуальний пристрій для виявлення несправностей водяних насосів, розроблений на основі Arduino Nano 33 BLE Sense, може значно підвищити ефективність управління фермерським господарством, зменшити витрати на обслуговування та ремонт обладнання та запобігти можливим фінансовим втратам в результаті простою обладнання.

Методика оцінки економічної ефективності використання інтелектуального пристрою для виявлення несправностей водяних насосів на базі Arduino Nano 33 BLE Sense включає низку фінансових показників, таких як віддача від інвестицій (ROI), період окупності і чистий присутній дохід (NPV). Для розрахунків потрібно врахувати вартість пристрою, вартість виконання процедур контролю та обслуговування насосів, та економію витрат, отриману завдяки вчасному виявленню несправностей та запобіганню втрат.

Віддача від інвестицій (ROI) визначається за формулою:

$$ROI = \frac{\Pi_p - K_B}{K_B} \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

де  $\Pi_p$  – прибуток фермерського господарства від виявлення несправностей водяних насосів, грн;  $K_B$  – капітальні вкладення у інтелектуальний пристрій для виявлення несправностей водяних насосів на базі Arduino Nano 33 BLE Sense, грн.

Період окупності (Payback Period) визначається за формулою:

$$PP = \frac{K_B}{\Pi_p}. \quad (5.2)$$

Чистий присутній дохід (Net Present Value, NPV) визначається за формулою:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (5.3)$$

де  $CF$  – грошовий потік у окремий період, грн;  $r$  – дисконтна ставка;  $n$  – кількість періодів.

Виконаємо розрахунок за наведеними вище формулами. Нехай вартість Arduino Nano 33 BLE Sense складає 2130 грн., а вартість робіт щодо комплектування та монтажу становить 1870 грн. Вартість створення нейромережевої моделі становить 4500 грн. Оцінка витрат на обслуговування і контроль становить 2300 грн. на рік. Припустимо, що завдяки вчасному виявленню несправностей та запобіганню втрат, фермер зекономив 8000 грн. на рік. Дисконтна ставка складає 10%.

Віддача від інвестицій (ROI) становить:

$$ROI = \frac{8000 - 6000}{6000} = 33,3\%.$$

Період окупності (Payback Period) становить:

$$PP = \frac{6000 + 0,1 \cdot 4000}{8000} = 0,8 \text{ року.}$$

Чистий дисконтний дохід (NPV) становить:

$$NPV = \frac{8000}{(1+0,1)^1} - \frac{6000}{(1+0,1)^1} = \frac{2000}{1,1} = 1819 \text{ грн.}$$

Встановлено, що прибуток фермерське господарство отримало уже в першому році використання пристрою для виявлення несправності насосів. Чистий дисконтний дохід за перший рік складає приблизно 1819 грн. від виявлення несправності одного насоса.

Ці показники допомагають оцінити, наскільки ефективним є використання інтелектуального пристрою для виявлення несправностей водяних насосів фермерських господарств. Виконані розрахунки дозволяють фермерам приймати обґрунтовані рішення щодо впровадження таких технологій на їхніх господарствах.



## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Незважаючи на досягнення сучасних технологій, проблеми з обслуговуванням та виявленням несправностей у системах водопостання залишаються актуальними завданнями для фермерських господарств. При цьому виникає необхідність у створенні інтелектуальних пристроїв, які забезпечать надійний моніторинг роботи водяних насосів та навчатися виявляти можливі несправності на ранніх етапах.

Наша кваліфікаційна робота спрямована на розробку та проектування інтелектуального пристрою для виявлення несправностей водяних насосів фермерських господарств з використанням технологій Інтернету речей (IoT) та мікроконтролерів. Основною платформою для реалізації цього пристрою обрано Arduino Nano 33 BLE Sense, яка володіє високою продуктивністю та можливостями для поєднання різноманітних датчиків та алгоритмів машинного навчання.

Нами проаналізовано основні причини виходу з ладу водяних насосів. Встановлено, що Найпоширенішими проблемами водяних насосів є надмірне споживання енергії (82%), витік ущільнень (53%), відсутність або низький потік (41%), відсутність або низький тиск (35%), надмірний шум або вібрація (24%) та інші (0,1%). Також відомо, що основною проблемою водяних насосів є надмірне енергоспоживання.

Нами виконано аналіз інтелектуальних пристроїв для виявлення несправності водяних насосів. Вони базуються на підключенні систем IoT, використанні обчислювальних методів, а також використанні штучних нейронних мереж.

Також пропонується використовувати цифрові двійники, які зазвичай складаються з двох основних компонентів, а саме фізичного та цифрового двійника (див. рис. 1.5). Фізичний двійник включає 1) фізичні пристрої, якими у нашому випадку є насоси; 2) Інтернет речей (IoT), наприклад датчики, які отримують і передають дані про продуктивність або стан фізичного пристрою.

Цифровий двійник передбачає: 1) інтеграцію даних і моделей, у якій дані з різних джерел, таких як комп'ютеризовані системи технічного обслуговування (наприклад, дані перевірки) та IoT (наприклад, дані датчиків), керуються та інтегруються в сховище даних; 2) аналіз даних, є найважливішим компонентом цифрового двійника, який виконує прогнози та створює інформацію для процесів прийняття обґрунтованих рішень.

Серед доступних джерел даних для моніторингу стану насосів і виявлення кавітації дані про звук і вібрацію отримали найбільше використання. Вчені довели, що поєднання технології Інтернету речей (IoT) і передових методів машинного навчання пропонує економічно ефективні та зручні інструменти для моніторингу умов роботи зрошувального насоса з високою надійністю.

Попередні дослідження також вивчали використання штучного інтелекту (AI) у діагностичному обслуговуванні, використовуючи такі методи, як алгоритми опорних векторних машин (SVM) для виявлення несправності насоса на основі вібрації.

Дані про вібрацію можуть бути отримані за допомогою контактного вимірювання, використовуючи такі інструменти, як акселерометри, прикріплені до джерела вібрації, або безконтактного вимірювання, яке використовує електромагнітне випромінювання від передачі даних.

На підставі проведеного аналізу виконано опис методів виявлення несправностей у відцентрових насосах. Встановлено, що методи класифікації вібраційних сигналів досягли загального показника успіху понад 90%. Методи класифікації звукових сигналів досягли лише 30% точності, а метод SVM досяг максимального показника 54% точності, що вказує на те, що звукові дані є менш надійними, ніж дані вібрації, і більш сприйнятливі до таких факторів, як навколишній шум.

Швидкий розвиток електронної промисловості сприяв збільшенню кількості та якості кількох компонентів, таких як блоки мікроконтролерів (MCU), одноплатні комп'ютери, датчики та радіоприймачі, за доступними

цінами. Окрім того, це сприяє застосуванню штучних нейронних мереж (ШНМ) на цих мікроконтролерних блоках (MCU), що дає прогрес у відповідних інструментах навчання, програмування та розгортання на програмних платформах, які демонструють підвищену зручність для користувача.

Враховуючи вище сказане, у нашій роботі пропонується використовувати машинне навчання для розробки моделі класифікації, яка може бути виконана локально на сенсорних вузлах для виявлення характерних випадків несправності типового водяного насоса, який є частиною стандартної водопровідної мережі. Нами запропоновано функціональну схему системи виявлення несправностей водяних насосів (рис. 2.1).

Нами пропонується використовувати плату Arduino Nano 33 BLE Sense із підтримкою штучного інтелекту в найменшому доступному розмірі 45x18 мм. Arduino Nano 33 BLE Sense – абсолютно нова плата у відомому форм-факторі, що поставляється з рядом вбудованих датчиків. Розширені функції плати Arduino Nano 33 BLE Sense роблять її придатною для підтримки завдань обробки та пам'яті, необхідних для виконання навченої моделі машинного навчання.

Пропонується використовувати модуль NodeMCU на основі чіпа ESP8266. На додаток до мікроконтролера Arduino використовувався модуль NodeMCU на основі чіпа ESP8266, який пропонує різноманітні варіанти підключення до мережі WiFi.

Нами використано для програмування Arduino Cloud. Arduino Cloud надає програми, веб-сервіси та ресурси для розробки проектів Arduino з широким діапазоном пристроїв. Передбачено включення моделі штучної нейронної мережі (ANM) у програмне забезпечення, що працює на мікроконтролері. Простою та ефективною платформою розробки для створення моделей машинного навчання на периферійних пристроях є хмарне середовище Edge Impulse. Ця платформа підтримує велику кількість плат розробки, включаючи блок Arduino Nano 33 BLE Sense.

Для створення моделі виявлення несправностей водяних насосів на базі блоку Arduino Nano 33 BLE Sense у середовищі Edge Impulse, слід скористатися інструментами цієї платформи. Загальний опис цього процесу представлено на рис. 2.6.

Інтелектуальний пристрій для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств працює у системі, яка була закритого типу, що означає, що вода тече з 50-літрового резервуара до водяного насоса і повертається в резервуар. Блок Arduino Nano 33 BLE Sense разом із вбудованими датчиками (наприклад, мікрофоном, акселерометром) був закріплений збоку від двигуна водяного насоса, щоб розпізнавати різні шаблони вібрації для кожного класу даних.

Нами проведено навчання моделі. Після процесу навчання Edge Impulse зберігає модель із найкращою продуктивністю у версії Quantized (int8), яка підходить для апаратної платформи Arduino. Edge Impulse дає можливість завантажити модель як код (бібліотеку та ескізи) для Arduino, доступний через середовище Arduino IDE, і запустити її в режимі реального часу.

Програмування NodeMCU також було виконано за допомогою програмного забезпечення Arduino IDE. Деталі взаємозв'язку між Arduino Nano 33 BLE Sense і платою NodeMCU під час випробувань насоса показано на рис. 3.5. Поєднання реалізації навченої моделі ШНМ із простими та більш звичайними методами програмування підвищило точність прогнозування.

Розроблено заходи із охорони праці, які стосуються створення належних умов праці та пожежної безпеки на робочому місці інженера-проектувальника інтелектуального пристрою для виявлення несправності водяних насосів фермерських господарств на основі Arduino Nano 33 BLE Sense.

Встановлено, що прибуток фермерське господарство отримало уже в першому році використання пристрою для виявлення несправності насосів. Чистий дисконтний дохід за перший рік складає приблизно 1819 грн. від виявлення несправності одного насоса.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко М. П. Основи автоматичного управління: Навчальний посібник. К.: Видавничий центр «Академія», 2006. 320 с.
2. Виготовлення друкованих плат для електроніки. URL: <https://renome.biz/uk/izgotovlenie-pechatnih-plat-dlja-jelektroniki/>
3. Відносини з інвесторами. URL: <http://investors.semtech.com>
4. Віртуальний STEM-центр Малої академії наук України. URL: <https://stemua.science/>
5. Гринь О.М., Іванов В.І., Кохан Б.А. Системи автоматичного управління: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 422 с.
6. Джерело І. І. Автоматизація технологічних процесів та виробництва: підручник. Х.: Видавництво «Фактор», 2011. 272 с.
7. Керівництво по виготовленню плати в домашніх умовах. URL: <https://cxem.net/master/12.php>
8. Курган Б.І., Калиниченко В.П. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва: Навчальний посібник. К.: Видавництво «Українські технології», 2010. 320 с.
9. Лагунова І.А., Кузьмін О.В., Цибульський Р.Б. Теорія автоматичного регулювання: підручник. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2013. 478 с.
10. Лемішка, О. М. Організація охорони праці в умовах автоматизації виробничих процесів : навчальний посібник. Київ : Видавничий дім «Слово», 2018. 256 с.
11. Програми для проектування друкованих плат. URL: [https://cxem.net/software/soft\\_PCB.php](https://cxem.net/software/soft_PCB.php)
12. Чернецький І. С. Сучасні експериментальні засоби навчального середовища. Мобільна комп'ютерна лабораторія NOVA 5000. Вісник

Чернігівського державного університету імені Т. Г. Шевченка. Педагогічні науки. Чернігів, 2012. Вип. 99. С. 377–382.

13. Abdelgayed, T.S.; Morsi, W.G.; Sidhu, T.S. Fault detection and classification based on co-training of semisupervised machine learning. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 65, 1595–1605.

14. Adafruit LSM6DS33, Description of the Adafruit 6-DoF IMU Utilizing the LSM6DS33 Chip. 2022. Available online: <https://www.adafruit.com/product/4480>

15. Adefemi, A.; Ilesanmi, D.; Olusegun, O.; Chinoyelum, E.; Oluwole, A. An adaptive Industrial Internet of things (IIOT) base technology for prediction and control of cavitation in centrifugal pumps. *Procedia CIRP* 2020, 91, 927–934.

16. Al Obaidi, A.R. Experimental Investigation of the Effect of Suction Valve Opening on the Performance and Detection of Cavitation in the Centrifugal Pump Based on Acoustic Analysis Technique. *Arch. Acoust.* 2019, 44, 59–69.

17. Arduino Cloud. URL: <https://app.arduino.cc>

18. Arduino Nano 33 BLE Sense. Overview of the Arduino Nano 33 BLE Sense Microcontroller Unit. 2022. Available online: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano-33-ble-sense>

19. Arduino Science Journal. URL: <https://www.arduino.cc/education/science-journal>

20. Arduino Software IDE. 2022. URL: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment> ESP8266WiFi

21. Burns, E.; Bruke, J. What Is an Artificial Neural Network (ANN)? SearchEnterpriseAI. 2022. URL: <https://searchenterpriseai.techtarget.com/definition/neural-network>

22. Čdina, M. Detection of Cavitation Phenomenon in a Centrifugal Pump Using Audible Sound. *Mech. Syst. Signal Process.* 2003, 17, 1335–1347.

23. Čdina, M.; Prezelj, J. Detection of Cavitation in Situ Operation of Kinetic Pumps: Effect of Cavitation on the Characteristic Discrete Frequency Component. *Appl. Acoust.* 2009, 70, 1175–1182.

24. Chen, X.; Huihui, Z.; Yijun, M. Analysis of vibration and noise induced by unsteady flow inside a centrifugal compressor. *Aerosp. Sci. Technol.* 2020, 107, 106286.
25. David, T.; Alexander, Y.; Robert, D. Pump Failure Detection Using Support Vector Data Descriptions. *Lect. Notes Comput. Sci.* 1999, 1642, 415–426.
26. EdgeImpulse. 2022. URL: <https://www.edgeimpulse.com/>
27. ESP8266. The ESP8266 Low-Cost Wi-Fi Microchip. 2022. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/ESP8266>
28. Harihara, P.P.; Parlos, A.G. Sensorless Detection of Impeller Cracks in Motor Driven Centrifugal Pumps. *Des. Anal. Control Diagn. Fluid Power Syst.* 2008, 5, 17–23.
29. Hu, Q.; Ohata, E.F.; Silva, F.H.S.; Ramalho, L.B.G.; Han, T.; Reboucas Filho, P.P. A New Online Approach for Classification of Pumps Vibration Patterns based on Intelligent IoT system. *Measurement* 2019, 151, 107138.
30. Jelle, B. *World Agriculture: Towards 2015/2030; An FAO Perspective*; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2003.
31. Kumar, A.; Gandhi, C.P.; Zhou, Y.; Kumar, R.; Xiang, J. Improved deep convolution neural network (CNN) for the identification of defects in the centrifugal pump using acoustic images. *Appl. Acoust.* 2020, 167, 107399.
32. Kyparissis, S.D.; Margaris, D.P. Experimental Investigation and Passive Flow Control of a Cavitating Centrifugal Pump. *Int. J. Rotating Mach.* 2012, 2012, 248082.
33. Lei, Y.; Yang, B.; Jiang, X.; Jia, F.; Li, N.; Nandi, A.K. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review roadmap. *Mech. Syst. Signal Process.* 2020, 138, 106587.
34. Leighton, T.G.; Phelps, A.; Ramble, D.G.; Sharpe, D.A. Comparison of the abilities of eight acoustic techniques to detect and size a single bubble. *Ultrasonics* 1996, 34, 661–667.

35. Ling, B.; Ling, Z.; Xiaoping, J.; Qinglong, P.; Daoxing, Y. Vibration in a Multistage Centrifugal Pump under Varied Conditions. *Shock Vib.* 2019, 2019, 2057031.
36. Liu, J.; Yang, X. Learning to See the Vibration: A Neural Network for Vibration Frequency Prediction. *Sensors* 2018, 18, 2530.
37. LoRa32u4. The LoRa32u4 Module Description. 2022. URL: <https://www.diy malls.com/LoRa32u4-II-Lora-Development-Board-868mhz-915mhz-Lora-Module>
38. Marwa L.I., Munishia S. and Mwamil T.B. Know-what, know-when and know-how: a web and mobile-based android application for early detection of pump failures in rural water supply projects, Tanzania. *Water Practice & Technology* Vol 00 No 0, 1 doi: 10.2166/wpt.2022.136
39. Mousmoulis, G.; Karlsen-Davies, N.; Aggidis, G.; Anagnostopoulos, I.; Papantonis, D. Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization. *Eur. J. Mech.-B/Fluids* 2019, 75, 300–311.
40. Neill, G.D.; Reuben, R.L.; Sandford, P.M.; Brown, E.R.; Steel, J.A. Detection of incipient cavitation in pumps using acoustic emission. *J. Process Mech. Eng.* 1997, 211, 267–277.
41. NodeMCU ESP8266 Detailed Review. Specifications, Overview and Setting Up Your NodeMCU. URL: <https://www.make-it.ca/nodemcu-details-specifications/>
42. Paraforos, D.S.; Griepentrog, H.W. Digital farming and field robotics: Internet of things, cloud computing, and big data. In *Fundamentals of Agricultural and Field Robotics*; Springer: Cham, Switzerland, 2021; pp. 365–385.
43. Raspberry Pi 3 Model B. Raspberry Pi 3 Model B Board Description on the Official Raspberry Site. 2022. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>
44. Raspberry Pi Pico. Overview of the Raspberry Pi Pico Microcontroller Unit. 2022. URL: <https://www.raspber-rypi.com/products/raspberry-pi-pico/>



45. Ray, P.P. A Review on TinyML: State-of-the-art and Prospects. *J. King Saud Univ.-Comput. Inf. Sci.* 2022, 34, 1595–1623.
46. Roy, A.; Dutta, H.; Griffith, H.; Biswas, S. An On-Device Learning System for Estimating Liquid Consumption from Consumer-Grade Water Bottles and Its Evaluation. *Sensors* 2022, 22, 2514.
47. Seyed, M.H.; Yihai, F.; Brandon, K.W. Predictive maintenance of pumps in civil infrastructure: State-of-the-art, challenges and future directions. *Autom. Constr.* 2022, 134, 104049.
48. Shagluf, A.; Parkinson, S.; Longstaff, A.P.; Fletcher, S. Adaptive decision support for suggesting a machine tool maintenance strategy. *J. Qual. Maint. Eng.* 2018, 24, 376–399.
49. TensorFlow Lite. URL: <https://www.tensorflow.org/lite>
50. The ESP8266WiFi Library Description for Arduino Environment. URL: <https://github.com/esp8266/Arduino/tree/master/libraries/ESP8266WiFi>
51. Vishwakarma, M.; Purohit, R.; Harshlata, V.; Rajput, P. Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines: A Review. *Mater. Proc.* 2017, 4, 2659–2664.
52. Wang, W.; Sun, H.; Guo, J.; Lao, L.; Wu, S.; Zhang, J. Experimental study on water pipeline leak using In-Pipe acoustic signal analysis and artificial neural network prediction. *Measurement* 2021, 186, 110094.
53. Warden, P.; Situnayake, D. *TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers*; O'Reilly Media, Inc.: Sebastopol, CA, USA, 2019; ISBN 978-1-4920-5201-2.
54. Yuxin, W.; Md Fashiar, R.; Honglun, X.; Tzu-Liang, B.T. Recent advances and trends of predictive maintenance from data-driven machine prognostics perspective. *Measurement* 2022, 187, 110276.

# Додатки

## Додаток А

### Код програмування Arduino Nano 33 BLE Sense для запису та передачі даних датчиків

```
#include <ArduinoBLE.h>
#include <Arduino_LSM9DS1.h>
BLEService motionService("180C"); // Створюємо BLE сервіс для передачі даних руху
BLECharacteristic motionCharacteristic("2A56", BLERead | BLENotify, 6); // Створюємо BLE характеристику для
даних руху

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  if (!IMU.begin()) {
    Serial.println("Failed to initialize IMU!");
    while (1);
  }

  if (!BLE.begin()) {
    Serial.println("Failed to initialize BLE!");
    while (1);
  }

  BLE.setLocalName("MotionSensor"); // Ім'я пристрою для BLE
  BLE.setAdvertisedService(motionService); // Повідомляємо BLE про сервіс даних руху
  motionService.addCharacteristic(motionCharacteristic); // Додаємо характеристику до сервісу
  BLE.addService(motionService); // Додаємо сервіс до BLE

  motionCharacteristic.writeValue("000000"); // Ініціалізуємо значення характеристики

  BLE.advertise(); // Починаємо рекламувати пристрій через BLE
  Serial.println("BLE Motion Sensor is now active!");
}

void loop() {
  BLEDevice central = BLE.central(); // Очікуємо з'єднання з центральним пристроєм (наприклад, смартфоном)
```

```
if (central) {  
  Serial.print("Connected to central: ");  
  Serial.println(central.address());  
  
  while (central.connected()) {  
    // Отримуємо дані акселерометра  
    sensors_event_t accel;  
    IMU.accelerationAvailable();  
    IMU.readAcceleration(accel);  
  
    // Конвертуємо значення в рядок (формат: "ax,ay,az")  
    String data = String(accel.acceleration.x) + "," + String(accel.acceleration.y) + "," + String(accel.acceleration.z);  
  
    // Оновлюємо значення характеристики та відправляємо їх центральному пристрою  
    motionCharacteristic.writeValue(data.c_str());  
  
    delay(100); // Затримка перед наступною ітерацією  
  }  
  
  Serial.print("Disconnected from central: ");  
  Serial.println(central.address());  
}  
}
```