

**Міністерство освіти і науки України  
Луцький національний технічний університет  
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ  
ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСУ СПІРАЛЬНОГО  
СВЕРДЛА**

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR  
DIAGNOSING AND PREDICTING THE WEAR OF A TWIST DRILL**

Спеціальність 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

освітня програма «Системи керування та діагностування технологічного  
устаткування»

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи СКДм-21  
**Герасимчук Дмитро Юрійович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник: д.т.н., професор  
**Пальчевський Богдан Олексійович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Гарант освітньої програми:  
д.т.н., професор  
**Пальчевський Б. О.**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: *магістр*

Галузь знань:

Спеціальність: *174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*

Освітня програма: *«Системи керування та діагностування технологічного устаткування»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О. Ю. Повстяной

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

\_\_\_\_\_ *Герасимчуку Дмитру Юрійовичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розробка та дослідження автоматизованої системи діагностування та прогнозування зносу спірального свердла*

керівник роботи \_\_\_\_\_ *Пальчевський Богдан Олексійович, д.т.н., професор*

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від " \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025\_\_ року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ *15.12.2025 р.*

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

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

*Аналіз стану проблеми та обґрунтування напрямку дослідження, Розробка системи автоматизованого моніторингу, Математична модель системи, програмна реалізація та алгоритм роботи системи, Експериментальні дослідження та аналіз результатів, Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях, Техніко-економічне обґрунтування.*

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

*Схема зв'язків між компонентами, Електрична схема, Блок-схеми алгоритму роботи програми, Графіки залежності зношення від потужності*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	Пальчевський Б.О.		
<i>Розділ 2</i>	Пальчевський Б.О.		
<i>Розділ 3</i>	Пальчевський Б.О.		
<i>Розділ 4</i>	Пальчевський Б.О.		
<i>Розділ 5</i>	Пальчевський Б.О.		
<i>Розділ 6</i>	Пальчевський Б.О.		
<i>Розділ 7</i>	Пальчевський Б.О.		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>			
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Федік Л. Ю.</i>		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

N з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів випускної кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Аналіз стану проблеми та обґрунтування напрямку дослідження</i>	<i>5.09.2025 р.</i>	
2	<i>Розробка системи автоматизованого моніторингу</i>	<i>12.09.2025 р.</i>	
3	<i>Математична модель системи</i>	<i>23.09.2025 р.</i>	
4	<i>Програмна реалізація та алгоритми роботи системи</i>	<i>8.10.2025 р.</i>	
5	<i>Експериментальні дослідження</i>	<i>15.10.2025 р.</i>	
6	<i>Оформлення роботи</i>	<i>01.12.2025 р.</i>	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

Герасимчук Д. Ю. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Пальчевський Б. О. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Герасимчук Д. Ю. Розробка та дослідження автоматизованої системи діагностування та прогнозування зносу спірального свердла. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Системи керування та діагностування технологічного устаткування» спеціальності 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена вирішенню актуального завдання підвищення ефективності механічної обробки шляхом розробки та дослідження автоматизованої системи діагностування та прогнозування зносу спірального свердла.

У роботі проведено аналіз існуючих методів контролю стану ріжучого інструменту та обґрунтовано доцільність використання агрегованої моделі, що базується на одночасному вимірюванні двох діагностичних параметрів: споживаної потужності шпинделя та осьової сили різання.

Розроблено функціональну та принципову електричну схеми системи моніторингу на базі мікроконтролера ESP32, датчика струму SCT13 та тензометричного модуля HX711. Запропоновано алгоритм діагностування, який включає попереднє навчання системи для визначення емпіричних коефіцієнтів та розрахунок усередненого показника зносу в реальному часі.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленої системи. Встановлено, що використання інтегрального показника зносу забезпечує вищу точність прогнозування стійкості інструменту порівняно з контролем окремих параметрів. Практична реалізація системи дозволяє своєчасно виявляти критичний знос свердла, зменшуючи ризик поломок та простоїв обладнання.

Ключові слова: спіральне свердло, моніторинг стану інструменту, знос свердла, датчик потужності, осьова сила різання, ESP32, автоматизована діагностика.

## ANNOTATION

Herasymchuk D. Development and research of an automated system for diagnosing and predicting the wear of a twist drill. Manuscript.

Qualification work of the master of OP «Control and diagnostic systems of technological equipment» specialty 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The Master's qualification work is dedicated to solving the relevant task of increasing machining efficiency through the development and research of an automated system for diagnosing and predicting spiral drill wear.

The paper analyzes existing methods of tool condition monitoring and substantiates the feasibility of using an aggregated model based on the simultaneous measurement of two diagnostic parameters: spindle power consumption and axial cutting force.

The functional and circuit diagrams of the monitoring system based on the ESP32 microcontroller, SCT13 current sensor, and HX711 load cell module have been developed. A diagnostic algorithm is proposed, which includes preliminary system training to determine empirical coefficients and calculation of the averaged wear indicator in real time.

Experimental studies have confirmed the effectiveness of the developed system. It has been established that the use of an integral wear indicator provides higher accuracy in predicting tool life compared to monitoring individual parameters. The practical implementation of the system allows for the timely detection of critical drill wear, reducing the risk of breakdowns and equipment downtime.

Keywords: twist drill, tool condition monitoring, drill wear, power sensor, axial cutting force, ESP32, automated diagnostic

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	11
1.1 Аналіз стану проблеми та обґрунтування напрямку дослідження	11
1.2 Сучасні методи діагностики стану ріжучого інструменту .....	12
1.3 Постановка задачі дослідження.....	13
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ .....	15
2.1 Обґрунтування функціональної схеми системи .....	15
2.2 Вибір технічних засобів автоматизації .....	16
2.3 Розробка принципової електричної схеми .....	19
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ.....	21
3.1 Розробка математичної моделі діагностування .....	21
3.2 Методика визначення емпіричних коефіцієнтів.....	22
РОЗДІЛ 4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ .....	25
4.1 Призначення програмного забезпечення.....	25
4.2 Структура програми.....	26
4.3 Алгоритм роботи системи.....	29
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	32
5.1 Програма та методика проведення досліджень .....	32
5.2 Калібрування системи діагностування .....	33
5.3 Результати експериментальних досліджень.....	34
5.4 Аналіз отриманих результатів .....	35
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	38
6.1 Аналіз умов праці та потенційних небезпек при експлуатації системи.....	38

6.2 Інженерно-технічні заходи охорони праці .....	39
6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях .....	40
РОЗДІЛ 7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ .....	41
ВИСНОВКИ.....	43
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	45
ДОДАТКИ.....	47

## ВСТУП

У сучасному машинобудуванні свердління є однією з найпоширеніших операцій механічної обробки, а продуктивність та якість виготовлення отворів безпосередньо залежать від стану ріжучого інструменту. Знос свердла це неминучий процес, який призводить до погіршення геометрії отворів, зростання сил різання та підвищення ймовірності виникнення аварійних ситуацій, таких як поломка інструменту.

Традиційні методи обслуговування часто покладаються на регламентну заміну інструменту, що є економічно неефективним: інструменти замінюються передчасно (використовуючи лише 50-80 % ресурсу) або, навпаки, експлуатуються понад міру, що спричиняє брак продукції. Ручна оцінка стану свердла вимагає зупинки обладнання, що призводить до значних простоїв.

Існуючі системи моніторингу, що базуються на контролі одного параметра (наприклад, тільки потужності або вібрації), часто не забезпечують достатньої точності через вплив зовнішніх факторів та змінних умов різання. Тому актуальним науково-технічним завданням є розробка автоматизованої системи діагностування, яка використовує комплексний підхід до оцінки зносу в режимі реального часу, поєднуючи кілька діагностичних ознак для підвищення надійності прогнозування.

Робота виконується відповідно до напрямку наукових досліджень кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету щодо створення сучасних систем керування та діагностування технологічного устаткування.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу свердління шляхом розробки та дослідження автоматизованої системи діагностування та прогнозування зносу спірального свердла, що забезпечує оперативний моніторинг стану інструменту в режимі реального часу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз технологічного процесу свердління як об'єкта керування та діагностування, виявити фактори, що впливають на знос інструменту;

- обґрунтувати вибір діагностичних параметрів для оцінки стану свердла та розробити функціональну схему системи автоматизованого моніторингу;

- розробити математичну модель та методику визначення інтегрального показника зносу на основі агрегування даних про споживану потужність та осьову силу різання;

- спроектувати та реалізувати апаратну частину системи діагностування на базі мікроконтролера ESP32 та відповідних датчиків;

- експериментально дослідити залежності діагностичних параметрів від величини зносу та перевірити адекватність запропонованої моделі;

Об'єкт дослідження – процес механічної обробки матеріалів свердлінням спіральним свердлом.

Предмет дослідження – методи та засоби автоматизованого діагностування і прогнозування зносу ріжучого інструменту за параметрами споживаної потужності та осьової сили різання.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що поєднує теоретичні та експериментальні методи:

- аналіз науково-технічної літератури для вивчення сучасного стану проблеми діагностування;

- методи математичного моделювання – для лінеаризації залежностей зносу та розрахунку емпіричних коефіцієнтів;

- експериментальні методи – для отримання даних про зміни потужності та сили різання в процесі експлуатації свердла;

- методи агрегування даних – для формування узагальненого висновку про стан інструменту.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

– удосконалено метод діагностування стану спірального свердла, який, на відміну від існуючих, базується на агрегуванні двох незалежних діагностичних ознак (приросту споживаної потужності та приросту осьової сили), що дозволяє підвищити точність прогнозування залишкового ресурсу інструменту та зменшити вплив випадкових збурень;

– набула подальшого розвитку математична модель взаємозв'язку зносу свердла з енергосиловими параметрами процесу різання шляхом визначення емпіричних коефіцієнтів у режимі навчання системи для конкретних умов обробки.

Розроблено та реалізовано прототип автоматизованої системи моніторингу на базі доступних компонентів (мікроконтролер ESP32, датчик SCT013, модуль HX711 та Zemic L6D), який може бути інтегрований у існуюче свердлильне обладнання без значних капіталовкладень.

Впровадження системи дозволяє:

- своєчасно виявляти критичний знос та попереджати поломку свердла;
- зменшити час простоїв обладнання;
- оптимізувати використання ресурсу ріжучого інструменту.

Магістерська робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 71 сторінку, основна частина викладена на 36 сторінках, містить 12 рисунків та 2 таблиці.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 1.1 Аналіз стану проблеми та обґрунтування напрямку досліджень

Свердління є одним із найпоширеніших технологічних процесів у машинобудуванні, що використовується для створення наскрізних або глухих отворів у деталях. Основним інструментом при цьому виступає спіральне свердло – циліндричний ріжучий інструмент із двома гвинтовими канавками, призначеними для відведення стружки із зони різання [1].

Ефективність процесу свердління визначається не лише обраними режимами різання (швидкістю обертання шпинделя, величиною подачі), але й поточним технічним станом ріжучого інструменту. У процесі експлуатації свердло піддається інтенсивному механічному, термічному та хімічному впливу з боку заготовки, що неминує призводить до його зношування [2].

Знос свердла – це поступовий процес втрати ріжучих властивостей, який відбувається переважно на задній поверхні інструменту через тертя та високі температури в зоні контакту. На ріжучій кромці утворюються зони абразивного та термічного зношення, що призводить до зміни геометрії леза.

Зміна геометрії ріжучої кромки суттєво впливає на фізику процесу різання. Затуплення інструменту викликає збільшення площі контакту між свердлом і деталлю, що, у свою чергу, призводить до зростання сил опору різанню та підвищення споживаної потужності приводу верстата. Наслідками роботи зношеним інструментом є погіршення точності розмірів отворів, зниження якості обробленої поверхні, перегрів інструменту, виникнення вібрацій та, у критичних випадках, поломка свердла.

Дослідження показують, що у промисловості ріжучі інструменти часто використовуються лише на 50-80% від їх ефективного ресурсу через консервативні стратегії заміни «з запасом», або ж, навпаки, експлуатуються до аварійного руйнування, що спричиняє брак продукції та простої обладнання. Таким чином, об'єкт керування (процес свердління) характеризується

стохастичністю процесу зношування, що вимагає впровадження систем оперативного контролю.

## 1.2 Сучасні методи діагностики стану ріжучого інструменту

Для забезпечення стабільності технологічного процесу та запобігання аварійним ситуаціям необхідний постійний моніторинг стану інструменту. Інтерес до систем автоматичної діагностики (Tool Condition Monitoring – TCM) зростає разом із поширенням автоматизованого виробництва [3, 4].

Існуючі методи діагностики можна розділити на прямі (візуальний контроль, вимірювання геометрії) та непрямі (оцінка зносу за супутніми фізичними процесами). Прямі методи є точними, але вимагають зупинки верстата, що знижує продуктивність. Тому для автоматизованих систем перевагу надають непрямим методам, які дозволяють оцінювати стан інструменту в режимі реального часу (online).

Основними діагностичними параметрами, що використовуються в сучасних системах моніторингу, є:

- Вібрація. Аналіз вібраційного сигналу дозволяє виявити зміни в динаміці різання, однак цей метод чутливий до зовнішніх шумів та вібрацій самого верстата.
- Акустична емісія. Метод базується на реєстрації високочастотних хвиль, що виникають при деформації матеріалу та терті. Він є ефективним для виявлення мікротріщин, але вимагає складної апаратури та обробки сигналів.
- Температура. Контроль температури в зоні різання дає інформацію про інтенсивність тертя, проте встановлення датчиків безпосередньо в зону контакту є технічно складним завданням.
- Силкові параметри (сила різання та крутний момент). Вимірювання сил різання є одним з найнадійніших методів, оскільки сила безпосередньо корелює зі зносом. Недоліком є необхідність використання відносно дорогих динамометрів.

– Споживана потужність (струм двигуна). Метод базується на вимірюванні електричної потужності або струму приводу шпинделя. Знос інструменту призводить до зростання моменту опору, що відображається на споживанні енергії. Цей метод є привабливим через простоту реалізації та відсутність необхідності втручання в механічну конструкцію верстата [5, 6].

Однак використання лише одного діагностичного параметра часто є недостатнім. Наприклад, на сигнал потужності можуть впливати коливання напруги в мережі, тертя в підшипниках шпинделя або зміни властивостей матеріалу заготовки, що може призвести до хибних спрацювань системи. Тому перспективним напрямком є створення комплексних систем, які аналізують декілька параметрів одночасно [7, 8, 9].

### 1.3 Постановка задачі дослідження

Аналіз існуючих рішень показує, що ключовою проблемою в машинобудуванні залишається прогнозування зносу інструменту в режимі реального часу з достатньою точністю та надійністю. Традиційні методи або занадто дорогі для масового впровадження, або мають низьку завадостійкість.

Метою даної роботи є підвищення ефективності діагностування стану спірального свердла шляхом розробки автоматизованої системи, що використовує агреговану модель моніторингу.

Для досягнення мети необхідно вирішити задачу інтеграції двох інформативних каналів отримання даних.

Канал вимірювання осьової сили різання ( $F_z$ ), який характеризує безпосереднє механічне навантаження на інструмент.

Канал вимірювання споживаної потужності шпинделя ( $P$ ), який відображає загальні енергетичні витрати на процес різання.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що використання інтегрального показника зносу, отриманого шляхом обробки та агрегування даних про силу та потужність, дозволить нівелювати вплив випадкових збурень, характерних для однопараметричних систем, та підвищити точність прогнозування

залишкового ресурсу свердла.

Відповідно до поставленої мети, у роботі необхідно:

- обґрунтувати математичну модель взаємозв'язку обраних діагностичних параметрів зі зносом інструменту;
- розробити апаратно-програмний комплекс на базі сучасних мікроконтролерів для збору та обробки даних у реальному часі;
- експериментально дослідити ефективність запропонованої системи та визначити емпіричні коефіцієнти для налаштування моделі під конкретні умови обробки.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ

#### 2.1 Обґрунтування функціональної схеми системи

Для реалізації методу діагностування, обґрунтованого в першому розділі, необхідно створити апаратно-програмний комплекс, який забезпечує безперервний збір даних про енергетичні та силові параметри процесу різання.

Функціональна структура розробленої системи базується на принципі зворотного зв'язку, де інформація про стан процесу обробки надходить до керуючого пристрою для прийняття рішень. Розроблена функціональна схема системи моніторингу представлена на рисунку 2.1.

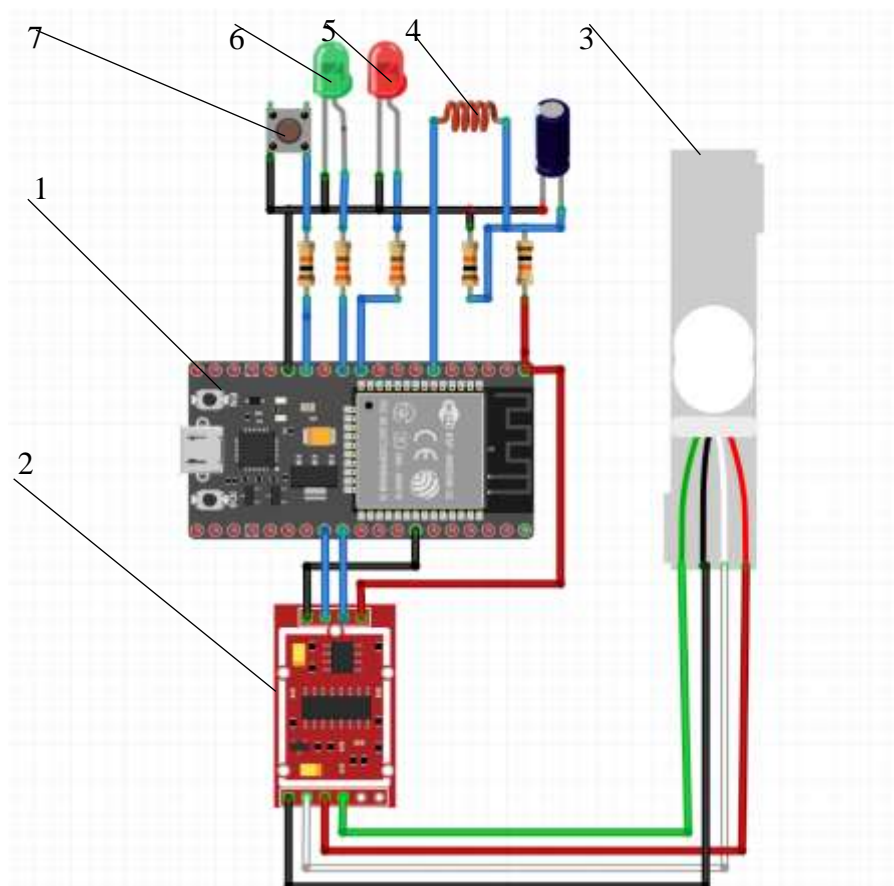


Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи моніторингу

1. Контролер ESP32; 2. підсилювач HX-711; 3. тензорезистивний мотовий датчик; 4. безконтактний датчик струму SCT013; 5. LED – індикатор аварійної роботи; 6. LED – індикатор нормальної роботи; 7. кнопка скидання.

Основні елементи системи взаємодіють наступним чином:

- об'єкт діагностування – технологічна система «верстат – пристосування – інструмент – деталь», де відбувається процес свердління;
- вимірювальна частина складається з двох каналів отримання інформації: канал вимірювання споживаної потужності: датчик струму фіксує навантаження на електродвигун шпинделя, яке зростає пропорційно затупленню ріжучих кромки; канал вимірювання осьової сили: тензометричний датчик, встановлений у кінематичному ланцюзі подачі або під заготовкою, реєструє зусилля подачі ( $F_z$ );
- блок обробки даних реалізовано на базі мікроконтролера. Він виконує функцію аналого-цифрового перетворення (для аналогових датчиків), первинну обробку сигналів (фільтрацію шумів), розрахунок інтегрального показника зносу за закладеним алгоритмом та порівняння отриманих значень із гранично допустимими уставками;
- блок індикації та керування забезпечує взаємодію з оператором. Він включає світлову сигналізацію стану процесу («Норма»/«Аварія») та органи ручного керування (кнопка скидання) для повернення системи у вихідний стан після обслуговування інструменту.

Така архітектура дозволяє реалізувати моніторинг у режимі реального часу без суттєвого втручання в конструкцію верстата, що є важливою умовою для модернізації існуючого обладнання.

## **2.2 Вибір технічних засобів автоматизації**

Вибір елементної бази здійснювався за критеріями швидкодії, точності вимірювань, надійності в умовах виробничих перешкод та економічної доцільності.

Обґрунтування вибору керуючого контролера.

У якості центрального обчислювального ядра системи обрано мікроконтролер ESP32 (рис. 2.2). Цей вибір зумовлений наступними технічними перевагами:

- Висока продуктивність: двоядерний процесор із тактовою частотою до 240 МГц забезпечує швидку обробку масивів даних у реальному часі.
- Інтегровані інтерфейси: наявність вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth дозволяє у майбутньому інтегрувати систему в промислову мережу IoT (Internet of Things) для дистанційного моніторингу.
- Розвинена периферія: наявність вбудованих 12-бітних АЦП (SAR ADC) та підтримка цифрових шин I2C/SPI спрощує підключення зовнішніх сенсорів [10, 11].



Рисунок 2.2 – Контролер ESP32

Засоби вимірювання електричних параметрів.

Для контролю навантаження на шпинделі використано модуль на базі трансформатора струму SCT013 (рис 2.3) для безконтактного вимірювання струму. Основні характеристики:

- забезпечує гальванічну розв'язку вимірювального кола від високовольтної мережі живлення двигуна, що є критичним для безпеки системи;
- висока лінійність вихідного аналогового сигналу дозволяє точно перераховувати виміряну напругу у значення споживаного струму та потужності [12].



Рисунок 2.3 – Безконтактний датчик струму SCT013

Засоби вимірювання силових параметрів.

Для реєстрації осьової сили різання застосовано тензорезистивний датчик Zemic L6D (рис. 2.4), який працює в парі з спеціалізованим модулем підсилювача-АЦП НХ711 (рис. 2.5).



Рисунок 2.4 – Тензорезистивний датчик Zemic L6D

Сам тензорезистивний датчик перетворює механічну деформацію пружного елемента в зміну електричного опору мостової схеми [13].

Модуль НХ711 забезпечує прецизійне підсилення слабкого сигналу з моста та його перетворення у цифровий код із розрядністю 24 біти. Це дозволяє фіксувати навіть незначні зміни зусилля подачі, характерні для

початкових стадій зносу інструменту [14].

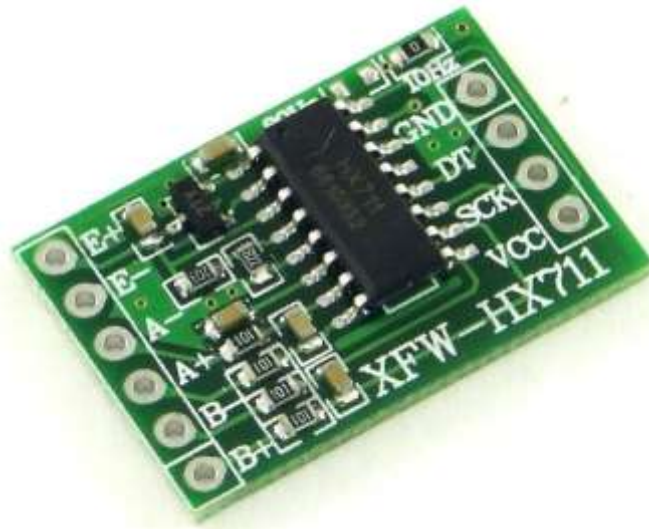


Рисунок 2.5 – Підсилювач-АЦП HX711

### 2.3 Розробка принципової електричної схеми

На основі обраних компонентів розроблено принципову електричну схему пристрою діагностування. Схема електрична принципова наведена на рисунку 2.6 (а також у Додатку А).

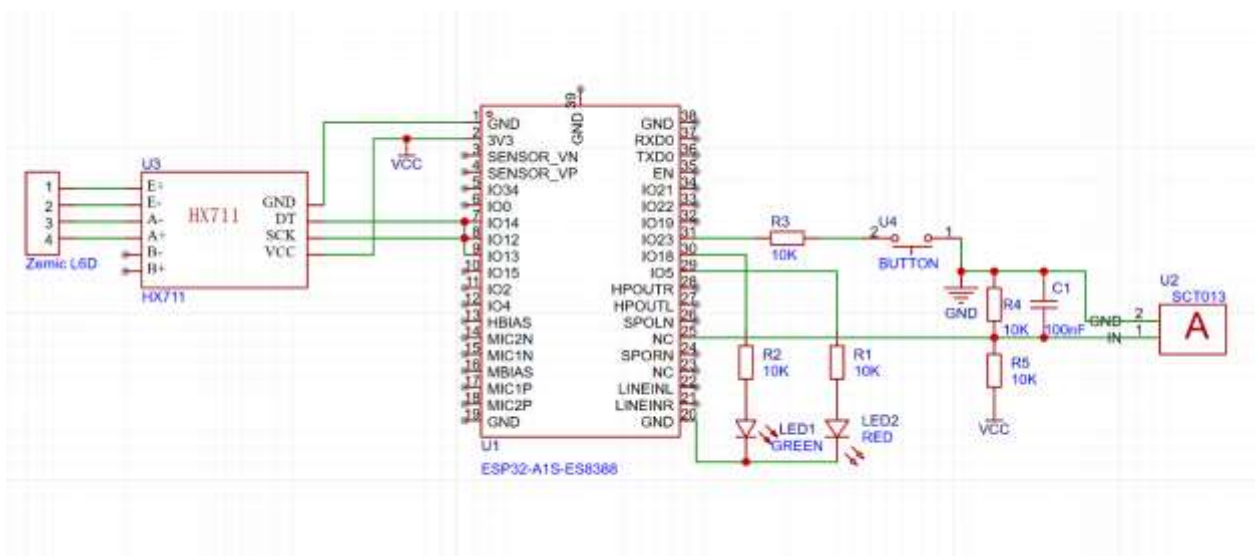


Рисунок 2.6 – Принципова електрична схема

Опис роботи схеми.

Центральним елементом схеми є плата розробника з мікроконтролером ESP32 (U1). Живлення схеми здійснюється напругою 5В (VCC), при цьому всі компоненти мають спільну шину заземлення (GND) для мінімізації наводок.

Підключення каналу виміру осьової сили: тензорезистивний датчик підключається до входів модуля підсилювача HX711 (U3). Модуль здійснює оцифровку сигналу та передає дані на мікроконтролер по двопровідному послідовному інтерфейсу через лінії SCK (тактування) та DT (дані).

Підключення каналу виміру потужності: вихід датчика струму (U2), який формує аналоговий сигнал пропорційний струму навантаження, підключено до одного з входів АЦП мікроконтролера.

Інтерфейс користувача.

Для візуалізації стану системи використано два світлодіоди: LED1 (зелений) та LED2 (червоний). Вони підключені до цифрових виходів ESP32 через струмообмежувальні резистори. Світіння зеленого індикатора сигналізує про штатний режим роботи (знос у межах норми), червоного – про досягнення критичного рівня зносу або перевантаження.

Тактова кнопка (Button) підключена до цифрового входу з підтягуючим резистором. Вона призначена для апаратного скидання стану «Аварія» після заміни інструменту або усунення несправності.

Розроблена схемотехнічна реалізація забезпечує необхідну функціональність для збору даних, їх первинної обробки та взаємодії з оператором, а використання модульної конструкції спрощує процес налаштування та ремонту системи.

## РОЗДІЛ 3

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЬ СИСТЕМИ

#### 3.1 Розробка математичної моделі діагностування

В основу роботи системи покладено метод непрямого оцінювання зносу інструменту. Як було визначено у попередніх розділах, найбільш інформативними діагностичними параметрами є споживана потужність різання ( $P$ ) та осьова сила ( $F_z$ ).

Для визначення стану свердла в процесі його роботи необхідно використовувати залежності цих параметрів від ступеня зносу свердла ( $W$ ). Згідно з літературними джерелами та проведеним аналізом, ці залежності мають степеневий характер [15, 16].

Математична модель, що описує зростання споживаної потужності ( $P$ ) та осової сили ( $F_z$ ) від величини зносу, має вигляд (3.1) та (3.2):

$$P = P_0 (1 + k_P W^n), \quad (3.1)$$

$$F_z = F_{z0} (1 + k_F W^m), \quad (3.2)$$

де  $P_0$ ,  $F_{z0}$  – споживана потужність і осьова сила при свердлінні новим свердлом;

$W$  – ступінь зносу свердла, наприклад, ширина зношеної фаски на задній поверхні свердла в мм;

$k_P$ ,  $n$ ,  $k_F$ ,  $m$  – емпіричні коефіцієнти, що залежать від матеріалу свердла і заготовки [17].

Для практичного визначення значень емпіричних коефіцієнтів  $k_P$ ,  $n$ ,  $k_F$ ,  $m$  необхідно здійснити навчання системи діагностики із заданими матеріалами свердла і заготовки. Тоді їх значення можна вважати постійними для подальшої роботи свердла. Для практичного визначення значення цих коефіцієнтів проведемо лінеаризацію залежностей. Спочатку здійснимо перетворення залежності наступним чином (3.3) та (3.4):

$$\frac{P}{P_0} - 1 = k_P \cdot W^n, \quad (3.3)$$

$$\frac{F_z}{F_{z0}} - 1 = k_F \cdot W^m, \quad (3.4)$$

або (3.5) та (3.6):

$$\frac{\Delta P}{P_0} = k_P \cdot W^n, \quad (3.5)$$

$$\frac{\Delta F_z}{F_{z0}} = k_F \cdot W^m, \quad (3.6)$$

де  $\Delta P$  – різниця споживаної потужності свердління зношеним та новим свердлом,

$\Delta F_z$  – різниця осьової сили різання при свердлінні зношеним та новим свердлом.

Прологарифмуємо ці вирази, щоби отримати лінійну залежність, зручну для проведення навчання системи діагностики (3,7) та (3,8):

$$\ln \frac{\Delta P}{P} = \ln k_P + n \cdot \ln W, \quad (3.7)$$

$$\ln \frac{\Delta F_z}{F_z} = \ln k_F + m \cdot \ln W. \quad (3.8)$$

### **3.2 Методика визначення емпіричних коефіцієнтів (Режим навчання)**

В режимі навчання здійснюється калібрування математичної моделі і визначення емпіричних коефіцієнтів моделі. Система працює в «режимі навчання», в якому експериментально визначають емпіричні коефіцієнти залежності кожного з діагностичних показників від величини зносу свердла для заданого матеріалу заготовки. Розрахунок емпіричних коефіцієнтів в цих

залежностях для заданого матеріалу заготовки і свердла може бути здійснено шляхом визначення значень двох точок в отриманих логарифмуванням лінійних залежностей.

Для цього здійснюють вимірювання величини зносу свердла  $W$  на задній поверхні свердла (рис. 3.1). Для нового свердла із значенням зносу 0 мм визначають величину споживаної потужності і осьової сили. Наприклад, при здійсненні свердління новим спіральним свердлом діаметром 10 мм деталі із сталі отримано датчиками системи діагностування значення  $P_0=300$  Вт,  $F_{z0}=450$  Н. При першому досліді робота свердла проводилася до значення споживаної потужності  $P_1=450$  Вт, причому осьове зусилля склало  $F_z=600$  Н. Заміряна величину зносу свердла склала  $W=0,2$  мм. При другому досліді робота свердла проводилася до значення споживаної потужності  $P_2=650$  Вт, причому осьове зусилля склало  $F_{z2}=800$  Н. Заміряна величину зносу свердла склала  $W=0,5$  мм. Для обох дослідів визначили значення споживаної потужності  $P_1$  і  $P_2$  та значення осьової сили  $F_{z1}$  і  $F_{z2}$ . Тоді отримаємо для кожного з параметрів системи із 2-х рівнянь.

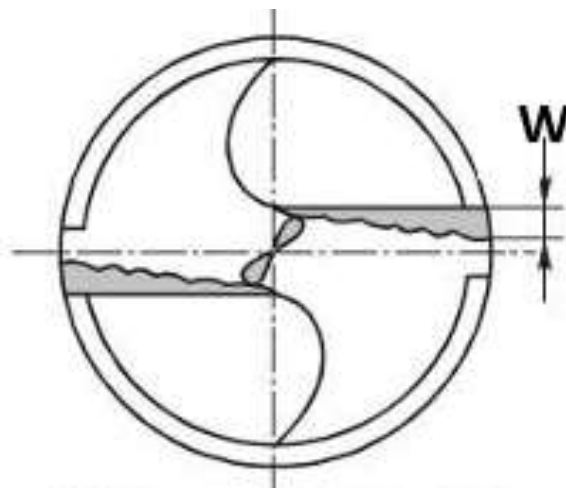


Рисунок 3.1 – Вимірювання зносу свердла

Для визначення залежності приросту споживаної потужності від величини зносу свердла 0,2 мм і 0,5 мм отримаємо систему із 2-х рівнянь (3.9):

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned}
 \ln \frac{600 - 450}{450} &= \ln k_F + m \cdot \ln 0,2 \\
 \ln \frac{800 - 450}{450} &= \ln k_F + m \cdot \ln 0,5
 \end{aligned} \right\}, \\
 \left. \begin{aligned}
 -1,100 &= \ln k_F + m \cdot (-1,609) \\
 -0,251 &= \ln k_F + m \cdot (-0,693)
 \end{aligned} \right\}.
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Розв'язання системи цих рівнянь дає значення:  $m = 0,927$ ;  $k_F = 1,48$ . Тоді залежність приросту осьової сили від величину зносу свердла для заданого матеріалу набере вигляду (3.10):

$$\frac{\Delta F_z}{F_{z0}} = 1,48 \cdot W^{0,927}. \tag{3.10}$$

Після здійснення калібрування, яке дозволяє визначити значення параметрів  $k_P$ ,  $k_F$ ,  $n$ ,  $m$  в процесі свердління певного матеріалу, при подальшій обробці деталей постійно контролюють значення споживаної потужності і осьової сили свердління, а по отриманих виразах розраховують величини зносу свердла по кожному з контрольованих параметрів (споживана потужність і осьова сила), тобто  $W_P$ ,  $W_F$ , далі розраховують їх усереднене (інтегроване) значення і порівнюють його з значенням допустимого зносу. В залежності від ступеню наближення до допустимого значення зносу система діагностування видає сигнал про продовження роботи чи про заміну свердла. При визначенні стану свердла також використовують додаткові показники, які проявляються при постійному моніторингу свердління, наприклад, для контролю процесу свердління критичнішим параметром є різке зростання осьової сили, що може призвести до руйнування свердла або втрати якості обробки.

## РОЗДІЛ 4

### ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ

#### 4.1 Призначення програмного забезпечення

Програмне забезпечення є ключовою складовою автоматизованої системи діагностування та прогнозування зносу спірального свердла, оскільки саме воно забезпечує взаємодію між вимірювальною частиною, аналітичним модулем та підсистемою індикації. Основне його призначення полягає у збиранні, обробці та інтерпретації сигналів від датчиків струму та осьової сили різання, а також у формуванні на їх основі діагностичних рішень щодо технічного стану ріжучого інструмента.

Під час роботи системи програмне забезпечення здійснює зчитування аналогового сигналу з датчика струму типу SCT-013, перетворює його в дійсне значення струму та обчислює електричну потужність процесу свердління. Паралельно з цим через перетворювач HX711 знімаються покази тензодатчика, які перераховуються в осьову силу різання. На основі цих даних реалізується процедура автоматичного визначення еталонних значень потужності  $P_0$  та осьової сили  $F_{z0}$ , що проводиться при першому свердлінні після натискання кнопки оператором. Таким чином, система самостійно фіксує базовий стан «нового» свердла без необхідності ручного введення еталонних параметрів.

Подальша робота програмного забезпечення орієнтована на розрахунок поточного ступеня зносу інструмента. З урахуванням отриманих раніше еталонних значень обчислюються відносні зміни потужності та осьової сили, після чого за аналітичними залежностями, побудованими на основі експериментальних даних, визначається ступінь зносу  $W$ . Розрахований показник порівнюється з установленим пороговим значенням, яке в даній роботі приймається більшим за одиницю, що дає змогу відокремити допустимий робочий знос від граничного. У разі перевищення порогу формується сигнал попередження для оператора.

Важливим аспектом роботи програмного забезпечення є забезпечення

простої та зрозумілої взаємодії з користувачем. Оператор використовує одну кнопку для запуску процедури зняття еталонних значень перед першим свердлінням, що мінімізує ймовірність помилки при налаштуванні. Стан інструмента відображається за допомогою двох світлодіодів: зелений відповідає нормальному режиму та допустимому рівню зносу, тоді як червоний сигналізує про перевищення граничного значення ступеня зносу  $i$ , у разі необхідності, може блимати, привертаючи увагу. Крім цього, через інтерфейс Serial виводяться числові значення потужності, осьової сили, еталонних параметрів та розрахованого ступеня зносу, що забезпечує можливість налагодження системи, аналізу тенденцій зміни параметрів та документування результатів експериментів.

Окремо слід відзначити роль програмного забезпечення в автоматизації процедури калібрування. Після натискання кнопки система самостійно виконує тарування тензодатчика, переходить у режим збирання еталонних даних та на основі кількох вимірювань потужності й сили формує усереднені значення  $P_0$  і  $F_{z0}$ . Такий підхід зменшує вплив людського фактору, підвищує повторюваність результатів та робить процес підготовки системи до роботи більш швидким і надійним.

У підсумку програмне забезпечення виступає центральною ланкою, яка пов'язує фізичний процес різання, математичну модель зносу та засоби індикації. Воно перетворює «сирі» електричні сигнали від датчиків на інформативні показники технічного стану свердла та забезпечує своєчасне інформування оператора про досягнення граничного зносу, що створює передумови для впровадження розробленої системи в реальні виробничі умови.

## 4.2 Структура програми

Програмне забезпечення автоматизованої системи діагностування та прогнозування зносу спірального свердла реалізовано у вигляді скетчу для мікроконтролера ESP32 в інтегрованому середовищі розробки Arduino IDE.

Вибір цього середовища дозволив використати наявні бібліотеки для роботи з периферійними пристроями та спростити процес налагодження алгоритмів цифрової обробки сигналів.

Програма має модульну структуру, характерну для вбудованих систем керування. У секції оголошень виконується прив'язка логічних імен до фізичних виводів мікроконтролера. Зокрема, конфігуруються входи для підключення датчика змінного струму та цифрового інтерфейсу модуля HX711 (лінії SCK та DT), а також вхід для тактової кнопки керування режимами. Виходи призначаються для керування світлодіодною індикацією, що візуалізує поточний стан інструменту («Норма» або «Аварія»).

Паралельно з налаштуванням апаратної частини у програмі задаються фізичні константи та параметри математичної моделі, обґрунтовані у підрозділі 3.1. До них належать розрядність та опорна напруга АЦП, прискорення вільного падіння, а також емпіричні коефіцієнти ( $k_p$ ,  $n$ ,  $k_f$ ,  $m$ ), отримані експериментальним шляхом для конкретних умов обробки. Для зберігання еталонних значень потужності ( $P_0$ ) та осьової сили ( $F_{z0}$ ), які визначаються в процесі навчання системи, а також для фіксації поточних режимів роботи, використовуються глобальні змінні та прапорці станів.

Функція початкової ініціалізації виконується одноразово при подачі живлення на мікроконтролер. Її основним завданням є налаштування периферійних модулів для коректної роботи. На цьому етапі встановлюється швидкість обміну даними через послідовний інтерфейс UART для діагностики, а порти введення-виведення перемикаються у відповідні режими. Окремо проводиться ініціалізація тензOMETричного модуля HX711, яка включає встановлення коефіцієнта масштабування та процедуру тарування для компенсації ваги оснастки при відсутності навантаження. Завершення процесу ініціалізації супроводжується ввімкненням зеленого світлодіода, що сигналізує оператору про готовність системи до роботи.

Основний алгоритм моніторингу реалізовано у нескінченному циклі. Процес починається з опитування кнопки керування: якщо фіксується натискання, система переходить у режим збирання еталону, обнуляючи

попередні базові значення та буфери усереднення. Далі виконується збір вимірювальної інформації з датчиків. Для каналу струму програмний алгоритм обробляє вибірку миттєвих значень з АЦП, обчислює середньоквадратичне значення (RMS) та розраховує активну потужність з урахуванням напруги мережі. Паралельно зчитуються дані з тензодатчика, які конвертуються у значення осьової сили в ньютонах.

Отримані «сирі» дані проходять етап цифрової фільтрації. Для усунення впливу шумів та вібрацій застосовується порогове відсікання малих значень, що дозволяє ігнорувати покази при роботі верстата на холостому ході. Залежно від активного режиму, відфільтровані дані використовуються по-різному. У режимі навчання система накопичує масив значень під час першого свердління та обчислює усереднені базові параметри  $P_0$  та  $F_{z0}$ . У робочому режимі виконується розрахунок поточного зносу за агрегованою моделлю, яка враховує відносні прирости як потужності, так і сили різання.

Завершальним етапом циклу є прийняття рішення та індикація. Розрахований інтегральний показник зносу  $W_{rez}$  порівнюється із заданим граничним значенням. У разі перевищення порогу система активує аварійну світлову сигналізацію, попереджаючи про необхідність заміни інструменту. Усі діагностичні параметри безперервно передаються у послідовний порт для логування та побудови графіків у реальному часі.

Нижче наведено лістинг основної частини програми (лістинг 4.1), що демонструє реалізацію алгоритму зчитування даних та розрахунку агрегованого показника зносу.

#### Лістинг 4.1 – Реалізація основного циклу діагностування

---

```
void loop() {
  // Перевірка натискання кнопки для скидання еталону
  if (digitalRead(BTN_PIN) == LOW) {
    resetCalibration();
  }
  // Зчитування та перетворення фізичних величин
  float currentForce = scale.get_units() * 9.81; // Сила в Ньютонах
```

```

double Irms = emon1.calcIrms(1480);      // Струм RMS
float currentPower = Irms * 230.0;      // Активна потужність
// Програмна фільтрація шуму холостого ходу
if (currentPower < 50) currentPower = 0;
if (currentForce < 5) currentForce = 0;
// Логіка роботи залежно від режиму
if (isLearningMode) {
    // Накопичення даних для визначення P0 та Fz0
    collectBaseline(currentPower, currentForce);
}
else if (currentPower > 100) {
    // Робочий режим: розрахунок відносних приростів
    float deltaP = (currentPower - basePower) / basePower;
    float deltaF = (currentForce - baseForce) / baseForce;
    // Розрахунок зносу за оберненими функціями моделі
    float wearP = pow((deltaP / kP), (1.0 / n_coeff));
    float wearF = pow((deltaF / kF), (1.0 / m_coeff));
    float totalWear = (wearP + wearF) / 2.0;
    Serial.print("Wear: "); Serial.println(totalWear);
    if (totalWear > WEAR_THRESHOLD) {
        digitalWrite(GREEN_LED, LOW);
        blinkRedLed(); // Сигналізація критичного зносу
    } else {
        digitalWrite(GREEN_LED, HIGH);
        digitalWrite(RED_LED, LOW); // Нормальний режим
    }
}

```

---

кінець лістингу 4.1

### 4.3 Алгоритм роботи системи

Блок-схема алгоритму роботи програми відображає (рис. 4.1) послідовність основних етапів функціонування системи діагностування зносу спірального свердла. На початку виконується ініціалізація мікроконтролера ESP32, налаштування датчиків струму та осьової сили, а також задання початкових значень еталонних параметрів і порогового ступеня зносу.

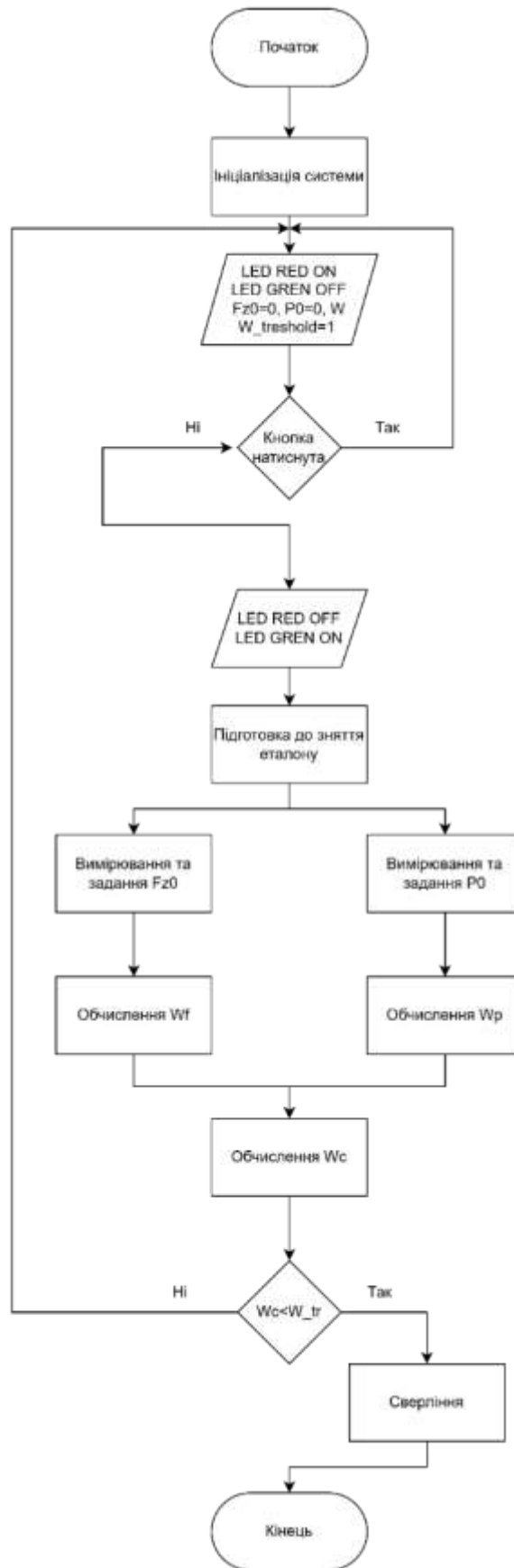


Рисунок 4.1 Блок-схема алгоритму роботи програми мікроконтролера ESP32

На етапі старту формується початковий режим індикації, за якого червоний світлодіод повідомляє про відсутність еталонних даних, а зелений – вимкнений. Після натискання кнопки система переходить у режим зняття еталону, здійснює серію вимірювань осьової сили та потужності при першому свердлінні, за результатами яких розраховуються та фіксуються еталонні значення  $F_{z0}$  і  $P_0$ . На основі поточних вимірювань та еталонних параметрів обчислюються часткові показники зносу  $W_f$  і  $W_p$ , після чого визначається інтегральний показник зносу  $W_c$ , який порівнюється з пороговим значенням  $W_{tr}$ . Якщо умова  $W_c < W_{tr}$  виконується, подальше свердління вважається допустимим, вмикається зелений світлодіод і система продовжує роботу в циклічному режимі. У разі перевищення порогу система сигналізує про недопустимий знос інструмента (активується червоний світлодіод), що є підставою для зупинки процесу та заміни свердла. Додатково в процесі роботи основні параметри та діагностичні показники виводяться через інтерфейс Serial, що забезпечує можливість контролю та аналізу результатів експериментів.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

#### 5.1 Програма та методика проведення досліджень

Метою експериментальних досліджень стала практична верифікація розробленої автоматизованої системи діагностування, оцінка точності прогнозування зносу спірального свердла та підтвердження ефективності запропонованої агрегованої математичної моделі. Експерименти проводилися на базі розробленого макету системи, підключеного до свердлильного верстата, оснащеного датчиком струму в колі живлення шпинделя та тензометричним столиком для реєстрації осьових зусиль.

Як оброблюваний матеріал використовувалися заготовки зі сталі товщиною 10 мм. Ріжучим інструментом виступало спіральне свердло діаметром 8 мм, виготовлене зі швидкорізальної сталі. Обробка здійснювалася на фіксованих режимах різання: швидкість обертання шпинделя становила 620 об/хв, а подача варіювалася в діапазоні 0,024-0,032 мм/об, установка для експерименту зображена на рисунках 5.1 та 5.2.



Рисунок 5.1 – Пристрій для діагностування

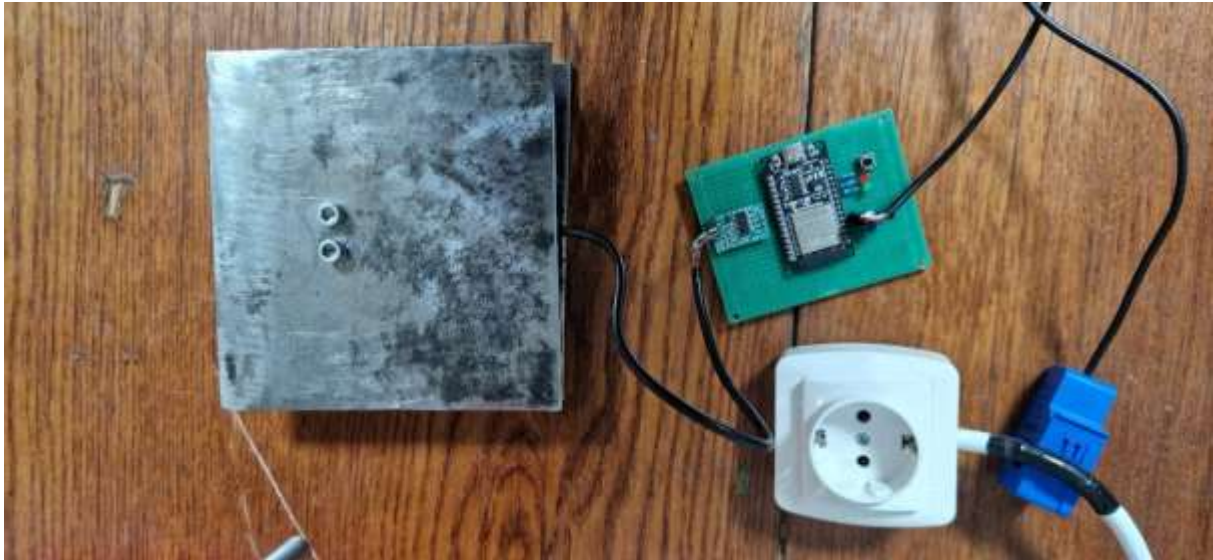


Рисунок 5.2 – Пристрій для діагностування

Методика проведення досліджень передбачала два послідовні етапи. На першому етапі здійснювалося навчання (калібрування) системи для визначення емпіричних коефіцієнтів моделі, специфічних для обраної пари «інструмент-матеріал». Другий етап полягав у проведенні серії контрольних свердлінь новим інструментом до моменту настання його критичного зносу. Під час експерименту система в реальному часі фіксувала енергетичні та силові параметри, а фактична величина зносу по задній поверхні періодично контролювалася за допомогою оптичного мікроскопа.

## 5.2 Калібрування системи діагностування

Для забезпечення коректної роботи алгоритму прогнозування було проведено попереднє визначення базових параметрів процесу. Для нового гострого свердла (знос  $W=0$ ) експериментально зафіксовано початкову споживану потужність на рівні  $P_0=200\text{Вт}$  та початкову осьову силу  $F_{z0}=370\text{Н}$ .

Процедура навчання системи базувалася на вимірюванні приростів діагностичних параметрів у контрольних точках зносу  $W=0,2\text{ мм}$  та  $W=0,7\text{ мм}$ . Шляхом розв'язання системи рівнянь, описаної в попередньому розділі, було розраховано емпіричні коефіцієнти, які характеризують динаміку затуплення інструменту для сталі. Для каналу вимірювання потужності отримано

значення показника степеня  $n=1,496$  та коефіцієнта пропорційності  $k_p=0,307$ . Для каналу осьової сили відповідні параметри склали  $m=0,76$  та  $k_F=0,09$ . Визначені коефіцієнти були занесені до енергонезалежної пам'яті мікроконтролера для забезпечення автономної роботи алгоритму діагностування.

### 5.3 Результати експериментальних досліджень

Основна серія досліджень полягала у безперервному моніторингу стану свердла від початку експлуатації до виходу з ладу. Система автоматично реєструвала приріст споживаної потужності ( $\Delta P$ ) та осьової сили ( $\Delta F_z$ ), на основі яких обчислювала прогнозовані значення зносу за кожним каналом окремо ( $W_P$ ,  $W_F$ ) та визначала узагальнений показник ( $W_C$ ). Отримані числові дані для п'ятнадцяти контрольних замірів зведено в таблицю 5.1 [1].

Таблиця 5.1 – Результати роботи системи діагностування

№ дослідю	Приріст потужності $\Delta P$ , W	Приріст осьової сили $\Delta F_z$ , Н	Величина зносу по потужності $W_P$ , мм	Величина зносу по осьовій силі $W_F$ , мм	Усереднена величина зносу $W_C = 1/2(W_P+W_F)$
1	6,443	2,651	0,221	0,036	0,128
2	9,758	4,314	0,292	0,068	0,180
3	6,036	9,848	0,212	0,201	0,206
4	12,075	10,634	0,336	0,222	0,279
5	12,332	13,500	0,341	0,304	0,323
6	18,246	16,012	0,443	0,381	0,412
7	19,804	19,158	0,468	0,482	0,475
8	27,150	22,259	0,578	0,588	0,583
9	24,407	22,998	0,538	0,614	0,576
10	39,348	25,761	0,741	0,712	0,727
11	37,738	27,604	0,720	0,780	0,750
12	47,086	32,079	0,835	0,951	0,893
13	47,833	36,959	0,844	1,145	0,995
14	61,769	38,421	1,001	1,205	1,103
15	63,282	40,881	1,018	1,308	1,163

Аналіз отриманих даних дозволяє простежити чітку кореляцію між фізичним зносом інструменту та зростанням енергосилових параметрів процесу різання. На графіку залежності зміни потужності (рис. 5.3) спостерігається монотонне зростання енергоспоживання, що пояснюється

збільшенням сил тертя на задній поверхні свердла. Аналогічна тенденція простежується і для осьової сили різання (рис. 5.4), хоча динаміка зростання цього параметра має свої особливості, пов'язані зі зміною геометрії ріжучої кромки.

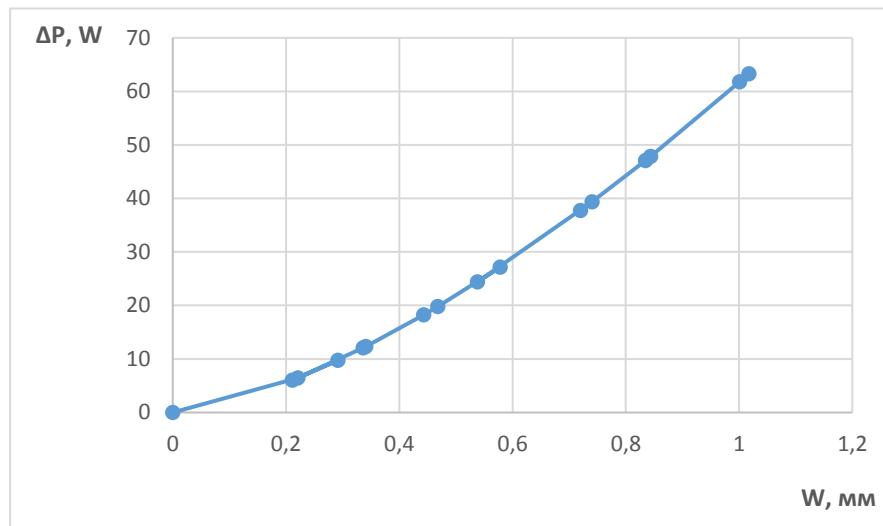


Рисунок 5.3 – Залежність зміни потужності різання при свердлінні від величини зносу свердла по задній поверхні

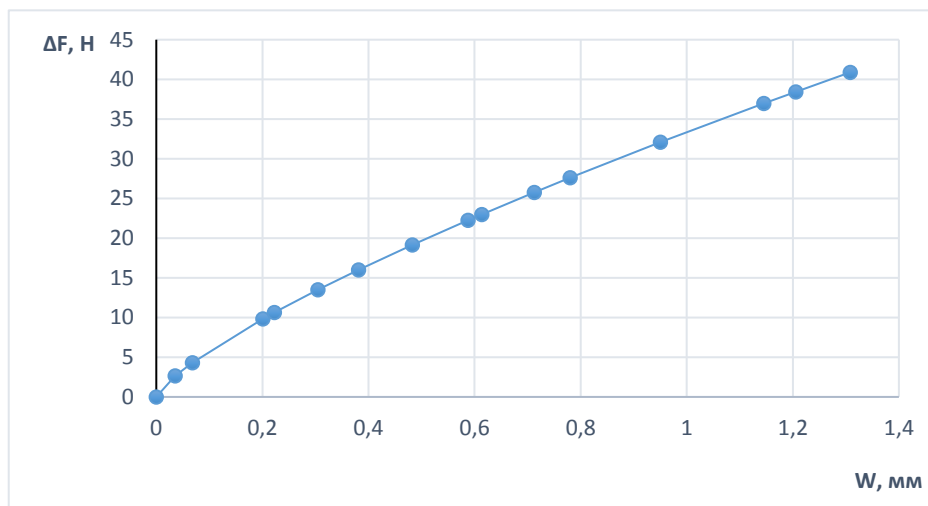


Рисунок 5.4 – Залежність зміни осьової сили різання при свердлінні від величини зносу свердла по задній поверхні

#### 5.4 Аналіз отриманих результатів

Узагальнюючи результати експерименту, можна стверджувати, що динаміка зносу свердла в часі має близький до лінійного характер на етапі нормальної експлуатації, а загальна стійкість інструменту в досліджуваних

умовах склала 17 хвилин. Це підтверджує адекватність обраної математичної моделі для опису реального фізичного процесу.

Детальне порівняння розрахункових значень зносу, отриманих за різними каналами вимірювання, свідчить про наявність певних розбіжностей, викликаних стохастичною природою процесу різання. Зокрема, у досліді №13 зафіксовано суттєву різницю між прогнозом по потужності ( $W_P=0,844$  мм) та по силі ( $W_F=1,145$  мм). Така ситуація може бути наслідком локальних неоднорідностей матеріалу заготовки або тимчасового налипання стружки, що по-різному впливає на крутний момент і осьове зусилля.

Використання агрегованого показника  $W_c$ , який є середнім арифметичним двох прогнозів, дозволило нівелювати похибки окремих вимірювальних каналів (рис. 5.5).

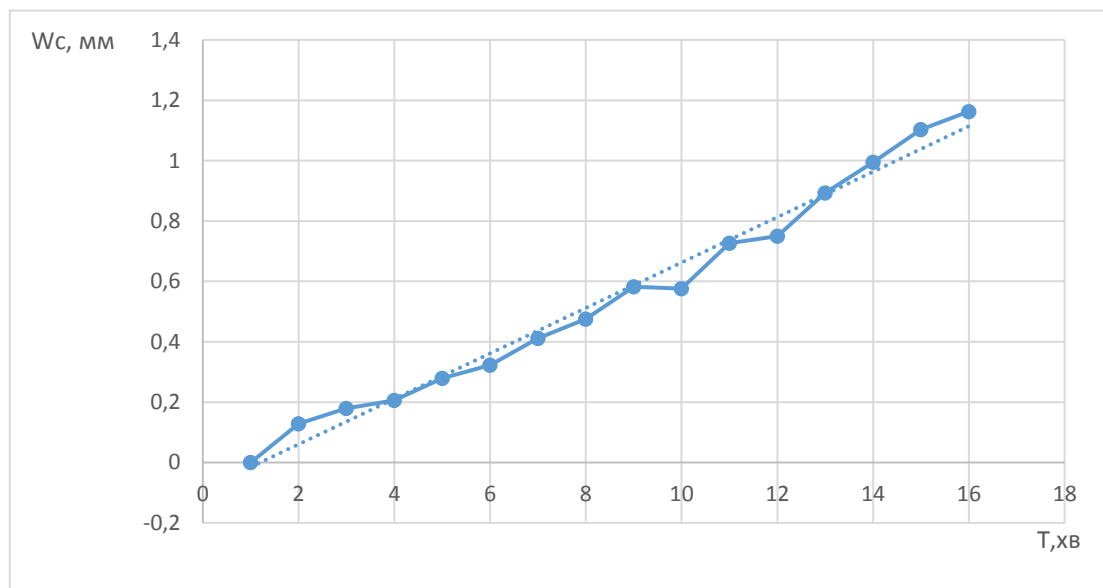


Рисунок 5.5 – Залежність зміни величини усередненого зносу свердла по заданій поверхні від часу його роботи

Як видно з результатів, інтегральна величина забезпечує більш плавну та достовірну характеристику стану інструменту, наближену до реальних значень, отриманих оптичним методом. Це експериментально підтверджує гіпотезу про те, що комплексна система діагностування, яка об'єднує інформацію про потужність та силу різання, має вищу надійність та точність порівняно з однопараметричними аналогами.

Таким чином, розроблена система довела свою ефективність і здатність своєчасно прогнозувати настання критичного зносу, що дозволяє запобігти аварійним зупинкам виробництва та підвищити якість механічної обробки[18].

## РОЗДІЛ 6

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 6.1 Аналіз умов праці та потенційних небезпек при експлуатації системи

Проектування та впровадження автоматизованої системи діагностування зносу свердла передбачає інтеграцію електронних компонентів у конструкцію існуючого металорізального обладнання. У зв'язку з цим, експлуатація модернізованого верстата супроводжується впливом комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, аналіз яких є необхідною умовою забезпечення безпеки персоналу.

Домінуючими небезпечними факторами фізичної природи у робочій зоні є рухомі частини виробничого обладнання, зокрема шпindel, що обертається з високою частотою, та ріжучий інструмент. Взаємодія з ними створює ризик механічного травмування, а процес різання металу супроводжується утворенням гострої стружки, яка становить загрозу для органів зору та відкритих ділянок шкіри оператора. Крім того, сама система діагностики покликана попередити критичний знос свердла, ігнорування якого може призвести до руйнування інструменту та розлітання його уламків, що є додатковим травмонебезпечним фактором.

Окрему групу ризиків становлять фактори електричного характеру. Оскільки розроблена система містить датчики, які мають безпосередній контакт або гальванічний зв'язок із силовими колами живлення електродвигуна верстата (напруга 220/380 В), виникає потенційна небезпека ураження електричним струмом. Порушення ізоляції з'єднувальних проводів, пошкодження корпусу датчика струму або блоку живлення мікроконтролера може призвести до появи небезпечного потенціалу на органах керування діагностичним пристроєм. Також слід враховувати шкідливі фактори виробничого середовища, такі як підвищений рівень шуму та вібрації, що

генеруються верстатом, і недостатнє освітлення, яке може ускладнювати візуальне зчитування показів світлодіодної індикації стану інструменту [19].

## **6.2 Інженерно-технічні заходи з охорони праці**

Забезпечення безпечних умов праці при експлуатації розробленої системи досягається шляхом реалізації комплексу організаційних та інженерно-технічних заходів. Пріоритетним напрямком є забезпечення електробезпеки. Конструкція вимірювального каналу потужності базується на використанні датчика SCT013, який забезпечує гальванічну розв'язку низьковольтних кіл мікроконтролера від силової мережі. Це технічне рішення є критично важливим, оскільки унеможлиблює потрапляння високої напруги на елементи, з якими контактує оператор.

Для захисту від ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції передбачено обов'язкове захисне заземлення всіх металевих частин корпусу верстата та блоку діагностики. Електронні компоненти системи, включаючи плату ESP32 та модуль АЦП, розміщуються у спеціальному діелектричному корпусі, що забезпечує ступінь захисту не нижче IP54. Таке конструктивне виконання запобігає потраплянню всередину пристрою струмопровідного пилу, вологи та мастильно-охолоджувальних рідин, які можуть спричинити коротке замикання.

Мінімізація механічних ризиків досягається встановленням захисних екранів у зоні різання, які перешкоджають вильоту стружки, не обмежуючи при цьому огляд робочої зони. Монтаж тензометричних датчиків та кабельних трас виконується таким чином, щоб виключити їх контакт з рухомими частинами верстата та запобігти випадковому механічному пошкодженню. Для покращення ергономічних показників блок індикації та керування розташовується у зоні прямої видимості оператора на безпечній відстані від шпинделя, а робоче місце обладнується системою комбінованого освітлення, що забезпечує нормативну освітленість для точних робіт.

### 6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях

Аналіз потенційних аварійних ситуацій показує, що найбільш ймовірною надзвичайною подією техногенного характеру при експлуатації розробленого пристрою є пожежа, спричинена несправністю електрообладнання. Коротке замикання в електропроводці або перегрів компонентів внаслідок перевантаження можуть стати джерелом займання.

Система протипожежного захисту на робочому місці базується на використанні негорючих матеріалів для корпусу приладу та ізоляції кабелів. Електрична схема пристрою оснащується плавкими запобіжниками або автоматичними вимикачами, які забезпечують миттєве знеструмлення обладнання при виникненні струмів короткого замикання. Для ліквідації можливих загорянь робоче місце комплектується первинними засобами пожежогасіння, зокрема вуглекислотними або порошковими вогнегасниками, що придатні для гасіння електроустановок під напругою.

Алгоритм дій персоналу у разі виникнення ознак аварійної ситуації, таких як поява диму, специфічного запаху горілої ізоляції або іскріння, передбачає негайне знеструмлення верстата та діагностичної системи за допомогою аварійного вимикача. При виявленні системою критичного рівня зносу інструменту, що супроводжується відповідною світловою сигналізацією, оператор зобов'язаний зупинити процес різання та замінити свердло, попереджаючи його аварійне руйнування. У випадку виникнення пожежі персонал діє згідно з інструкцією об'єкта, повідомляючи керівництво та пожежну службу і вживаючи заходів щодо евакуації та локалізації вогню наявними засобами [20, 21].

## РОЗДІЛ 7

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Для розрахунку витрат на обладнання для запуску автоматизованої системи діагностування та прогнозування зносу спірального свердла скористаємось актуальними даними виробників та постачальників електронних компонентів, занесемо їх в таблицю 7.1.

Таблиця 7.1 – Розрахунок вартості КВП і А

№ з/п	Назва приладу	Тип приладу	Кількість	Вартість одного приладу, грн.	Загальні вартість приладі, грн.
1	Мікроконтролерна плата	ESP32 Development Board (WiFi/Bluetooth)	1	320	320
2	Датчик струму	SCT013	1	180	180
3	Тензометричний датчик	Zemic L6D	1	2600	2600
4	Модуль АЦП	HX711 (24-біт)	1	80	80
5	Блок живлення	Mean Well HDR-15-5 (5V, 2.4A, DIN)	1	480	480
6	Корпус приладу	ABS пластик, IP54 (герметичний)	1	350	350
7	Органи індикації та керування	Комплект (LED, кнопки, роз'єми)	1	250	250
8	Монтажні матеріали	Кабель екранований, кріплення	1	400	400
Всього					4660

Згідно розрахунків, загальні витрати на прилади  $V_{\text{КВПіА}} = 4660$  грн.

Прийmemo вартість транспортно-заготівельних витрат 25% від загальних витрат на прилади:

$$V_{\text{тр}} = 4660 * 0,25 = 1165 \text{ грн.}$$

Вартість монтажних робіт, включно з матеріалами, прийmemo як 45% від загальних витрат на прилади:

$$V_{\text{м}} = 4660 * 0,45 = 2097 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження прийнято розраховувати як 10% від загальних витрат на прилади:

$$V_n = 4660 * 0,1 = 466 \text{ грн.}$$

Тоді загальні вкладення для запуску автоматизованої системи діагностування становлять суму всіх вище перерахованих затрат (7.1):

$$V = V_{\text{КВПіА}} + V_{\text{тр}} + V_{\text{м}} + V_{\text{н}}, \quad (7.1)$$

де  $V_{\text{КВПіА}}$  – загальна вартість приладів та засобів автоматизації;

$V_{\text{тр}}$  – транспортні витрати;

$V_{\text{м}}$  – витрати на монтаж;

$V_{\text{н}}$  – витрати на налагодження обладнання.

$$V = 4660 + 1165 + 2097 + 466 = 8388 \text{ грн.}$$

Таким чином, загальні вкладення для запуску автоматизованої системи діагностування та прогнозування зносу спірального свердла становлять 8388 грн. Дана вартість є значно нижчою за промислові аналоги систем моніторингу, що підтверджує економічну доцільність розробки [22].

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності процесу механічної обробки шляхом розробки та дослідження автоматизованої системи діагностування та прогнозування зносу спірального свердла.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

- проведено аналіз технологічного процесу свердління як об'єкта керування. Встановлено, що традиційні методи регламентної заміни інструменту є економічно неефективними, оскільки призводять до недовикористання ресурсу свердла на 20-50% або до аварійних зупинок через його поломку. Обґрунтовано, що найбільш інформативними параметрами для оперативного діагностування є споживана потужність шпинделя та осьова сила різання;

- розроблено та обґрунтовано агреговану математичну модель зносу інструменту. На відміну від однопараметричних методів, запропонована модель базується на одночасному аналізі відносних приростів потужності та сили, що дозволяє нівелювати вплив випадкових збурень (неоднорідність матеріалу, налипання стружки) та підвищити достовірність діагнозу;

- спроектовано апаратно-програмний комплекс системи моніторингу на базі мікроконтролера ESP32. Розроблено принципову електричну схему, яка включає безконтактний датчик струму SCT013 для контролю навантаження на приводі та тензометричний модуль (Zemisc L6D + HX711) для вимірювання осьових зусиль. Застосування сучасної елементної бази дозволило забезпечити високу швидкодію та точність вимірювань (АЦП 24 біти) при низькій собівартості пристрою;

- розроблено алгоритм та програмне забезпечення, яке реалізує функцію автоматичного навчання системи (визначення еталонних значень  $P_0$  та  $F_{z0}$  для нового інструменту) та розрахунок інтегрального показника зносу в

реальному часі. Алгоритм передбачає цифрову фільтрацію сигналів та світлову індикацію станів «Норма»/«Аварія»;

– експериментально підтверджено ефективність розробки. Проведені дослідження на сталі, показали, що динаміка зносу має близький до лінійного характер. Порівняльний аналіз довів, що використання усередненого (агрегованого) показника зносу забезпечує вищу точність прогнозування порівняно з окремими каналами вимірювання. Стійкість досліджуваного свердла склала 17 хвилин, що було коректно зафіксовано системою;

– виконано аналіз питань охорони праці, ідентифіковано основні небезпеки (електричний струм, рухомі частини) та запропоновано інженерні рішення для забезпечення безпеки (гальванічна розв'язка датчиків, захисне заземлення, екранування);

– здійснено техніко-економічне обґрунтування. Розрахунок показав, що капітальні витрати на виготовлення системи становлять 8388 грн, що значно нижче вартості промислових аналогів. Впровадження системи є економічно доцільним за рахунок зменшення простоїв обладнання та повного використання ресурсу ріжучого інструменту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пальчевський Б. О., Герасимчук Д. Ю. Автоматична діагностика стану свердла за декількома діагностичними ознаками. *Науковий вісник ЛНТУ*. 2025. № 2. С. 29-42.
2. Бойко В. І., Молчанов П. О. Технологія машинобудування: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 356 с.
3. Teti R., D'Addona D. Sensor monitoring of machining. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. 2022. PP. 1-12.
4. Kuntoglu M., Aslan A., Pimenov D. Y. A review of signal processing techniques in tool condition monitoring systems. *Machines*. 2021. Vol. 9, No. 9. P. 191.
5. Traini E., Bruno G., D'Antonio G. Machine learning for tool condition monitoring in drilling: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. PP. 665-688.
6. Nasir V., Sassani F. A review on deep learning in machining and tool monitoring: Methods, opportunities, and challenges. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 115. PP. 2683-2709.
7. Pimenov D. Y., Bustillo A., Mikolajczyk T. Artificial intelligence for automatic prediction of tool wear: Real-time monitoring in modern manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Vol. 34. PP. 1-32.
8. Mareš A., Hruška P. Tool wear monitoring in drilling process based on spindle motor current. *MM Science Journal*. 2021. Vol. 2021, No. 4. PP. 4972-4978.
9. Huang Z., Zhu K. Tool wear monitoring for drilling based on force signals and a convolutional neural network. *Measurement*. 2021. Vol. 185. Art. 110068.
10. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual (Version 4.6). 2022. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf) (дата звернення: 12.10.2025).

11. Maier A., Sharp A., Vagapov Y. Low-cost Condition Monitoring using ESP32 and IoT Technologies. *2021 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2021. P. 112-117. doi: 10.1109/ICIT46573.2021.9453549.
12. YHDC. SCT013 Series Current Transformer Product Specification. 2023. URL: <https://en.yhdc.com/product/current-transformer> (дата звернення: 10.12.2025).
13. Zemic Europe. L6D Single Point Load Cell Datasheet. URL: <https://www.zemic.nl> (дата звернення: 12.10.2025).
14. Avia Semiconductor. HX711 Datasheet: 24-Bit ADC for Weigh Scales (Updated version). 2021. URL: [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Force/HX711\\_english.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Force/HX711_english.pdf) (дата звернення: 12.10.2025).
15. Groover M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 7th ed. Wiley, 2020. 800 p.
16. Davim J. P. *Machining: Fundamentals and Recent Advances*. Springer, 2020. 320 p.
17. Astakhov V. P. *Metal Cutting Mechanics*. CRC Press, 2022. 450 p.
18. Степанов М. С., Литвин О. В. *Основи формоутворення поверхонь та ріжучий інструмент: навчальний посібник*. Львів: Новий Світ-2000, 2022. 248 с.
19. ДСТУ EN ISO 12100:2016. *Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків*. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
20. ДСТУ ISO 45001:2019. *Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування*. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020.
21. Цопа В. А. *Охорона праці в галузі: навчальний посібник*. Київ: Каравела, 2021. 312 с.
22. Квітка А. В. *Економічне обґрунтування інженерних рішень: методичні вказівки*. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. 45 с.