

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

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

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: *Комп'ютеризована система пошуку металевих предметів*

Виконав: студент 4 курсу, групи СІ-41
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Данилишин А.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Тини Є.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Луцик Н.С.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Осухівська Г.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

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

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«27» січня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

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

студента Данилишин А.І.
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютеризована система пошуку металевих предметів

Керівник роботи к.т.н., доц. Тиш Є.В.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 27 » січня 2025 року № 4/7-53

2. Термін подання студентом завершеної роботи 18.06.2025р

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання

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

Вступ. 1. Аналіз технічного завдання

2. Проєктна частина

3. Практична частина

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Висновки

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

1. Схема електрична принципова

2. Структурна схема системи

3. Алгоритм роботи системи

4. Монтажна схема

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я.</i>		

7. Дата видачі завдання 27.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розробка технічного завдання</i>	<i>27.01 – 02.02</i>	<i>Викон.</i>
2.	<i>Аналіз вимог та оцінка рішень</i>	<i>01.04 – 15.04</i>	<i>Викон.</i>
3.	<i>Проектування структури й вибір компонентів</i>	<i>15.04 – 30.04</i>	<i>Викон.</i>
4.	<i>Реалізація пристрою та його тестування</i>	<i>01.05 – 15.05</i>	<i>Викон.</i>
5.	<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>15.05 – 30.05</i>	<i>Викон.</i>
6.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>01.06 – 08.06</i>	<i>Викон.</i>
7.	<i>Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами</i>	<i>9.06 – 15.06</i>	<i>Викон.</i>
8.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>16.06 – 22.06</i>	<i>Викон.</i>
9.	<i>Захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>25.06</i>	<i>Викон.</i>

Студент

(підпис)

Данилишин А.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Тим С.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Данилишин А.І. Комп'ютеризована система пошуку металевих предметів: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спец. 123 – комп'ютерна інженерія. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025.

Ключові слова: комп'ютерна система, металеві об'єкти, індуктивний сенсор, мікроконтролер, обробка сигналу, фазовий аналіз, вбудовані системи.

У кваліфікаційній роботі представлено проєкт комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів з використанням мікроконтролера Arduino Nano, аналогової та цифрової обробки сигналів, а також LCD-індикації. Реалізовано апаратну схему з операційним підсилювачем TL081, транзисторним ключем і модулем звукового оповіщення. Програмну частину створено в середовищі Arduino IDE з використанням таймерів, ШІМ-генерації, АЦП і фазового аналізу. Проведено експериментальну перевірку пристрою на зразках з різних металів, що підтвердило ефективність його роботи та здатність до розрізнення типу матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для побутових або навчальних застосувань із подальшим розширенням функціоналу.

ANNOTATION

Danylyshyn A.I. Computerized metal object search system: Bachelor's Graduation Thesis: speciality 123 – computer engineering. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2025.

Keywords: computer system, metal objects, inductive sensor, microcontroller, signal processing, phase analysis, embedded systems.

This qualification project presents the development of a computerized system for metal object detection based on an Arduino Nano microcontroller, analog and digital signal processing, and LCD indication. The hardware includes a TL081 operational amplifier, a transistor switch, and a sound notification module. The software was developed using the Arduino IDE and involves timer configuration, PWM signal generation, ADC usage, and phase-based analysis. Experimental testing was carried out using samples of different metals, confirming the system's effectiveness and its ability to differentiate material types. The solution can be applied in household or educational scenarios with potential for further functional enhancement.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ	10
1.1 Аналіз вимог до комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів	10
1.2 Аналіз можливих рішень поставленого завдання	11
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА.....	19
2.1 Розробка узагальненої структури комп'ютеризованої системи	19
2.2 Обґрунтування вибору апаратного забезпечення комп'ютеризованої системи	22
2.3 Обґрунтування вибору програмного забезпечення комп'ютеризованої системи	36
2.4 Проєктування комп'ютеризованої системи	39
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	42
3.1 Реалізація проєктного рішення.....	42
3.2 Тестування	52
РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .	57
4.1 Долікарська допомога при вивихах.....	57
4.2 Заходи покращення умов оператора	59
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64
Додаток А Технічне завдання	
Додаток Б Код керування контролером	

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.					Комп'ютеризована система пошуку металевих предметів				Літ.	Арк.	Аркуші	
Перевір.											6	68
Реценз.									ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41			
Н. Контр.												
Затверд.	Осухівська Г.М.											

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

AREF – Analog Reference

AVR – Advanced Virtual RISC

IDE – Integrated Development Environment

LED – Light Emitting Diode

PI – Pulse Induction

RAM – Random Access Memory

SAM – Smart ARM-based Microcontroller

SPI – Serial Peripheral Interface

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

VLF – Very Low Frequency

АЦП – Аналого-Цифровий Перетворювач

					<i>КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Однією з ключових задач сучасної технічної галузі, що стосується безпеки, археології, промисловості й воєнної справи, є виявлення прихованих металевих об'єктів у середовищі, де їх наявність або відсутність може мати критичне значення. У таких сферах, як пошук вибухонебезпечних предметів, контроль за проносом металевих предметів на об'єкти з підвищеними вимогами безпеки, виявлення інженерних комунікацій у ґрунті, а також у пошуково-рятувальних та археологічних роботах, потреба в точному й надійному виявленні металів залишається надзвичайно гострою.

Традиційні рішення, засновані на аналогових або напівцифрових пристроях, мають низку суттєвих недоліків, зокрема обмежену можливість адаптації до складних умов середовища, обмежену чутливість, труднощі в калібруванні та інтерпретації сигналів [13]. Більшість недорогих приладів на ринку орієнтовані на побутове застосування і не забезпечують належної точності у складних сценаріях, таких як багат шарова структура ґрунту, наявність магнітних перешкод чи потреба у фільтрації хибних спрацювань.

Разом із тим, стрімкий розвиток мікроелектроніки, доступність високопродуктивних одноплатних комп'ютерів та мікроконтролерів (типу Arduino, ESP32, Raspberry Pi), а також удосконалення цифрових методів обробки сигналів відкриває нові горизонти для створення інтелектуальних систем виявлення металів [14]. Впровадження комп'ютеризованих рішень дозволяє не лише автоматизувати процес аналізу сигналу, а й інтегрувати алгоритми машинного навчання для зменшення кількості помилкових детекцій, покращення точності класифікації та створення інтуїтивно зрозумілого користувацького інтерфейсу.

Наукова література останніх років фіксує зростання кількості досліджень у сфері цифрових систем обробки даних від індуктивних сенсорів, що дає змогу реалізовувати гнучкі системи з можливістю реконфігурації. Проте більшість існуючих рішень або залишаються на рівні концептів, або не

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

адаптовані до реальних умов використання в польових умовах. Зокрема, українська технічна школа гостро потребує прикладних розробок у цьому напрямі, які б могли бути використані як у цивільних цілях (будівництво, енергетика), так і в оборонно-промисловому секторі.

У сучасних умовах ведення бойових дій на території України проблема виявлення залишків небезпечних металевих предметів, включно з боєприпасами, уламками та інженерними конструкціями, стає не лише технічною, а й гуманітарною проблемою. Надійне виявлення таких об'єктів сприяє зменшенню ризиків для саперних команд, цивільного населення, а також дозволяє ефективно очищувати території від загроз.

Тому потреба в розробці комп'ютеризованих систем виявлення металевих об'єктів, які б поєднували апаратну адаптивність, надійність в польових умовах та аналітичну точність цифрових алгоритмів, є не лише актуальною, а й надзвичайно доцільною в контексті технологічного розвитку держави. Такий підхід не тільки покращує ефективність роботи у відповідних сферах, але й відкриває перспективи для розвитку власних технологічних рішень в Україні.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз вимог до комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів

Для досягнення зазначених характеристик комп'ютеризована система має реалізовувати низку ключових функцій, кожна з яких забезпечує певний аспект її ефективного функціонування. До основних функціональних вимог належать:

- виявлення наявності металевих об'єктів в межах зони дії сенсора в реальному часі;
- забезпечення звукової сигналізації про факт виявлення;
- підтримка налаштування рівня чутливості або автокалібрування пристрою;
- автономна робота без постійного підключення до зовнішніх систем;
- можливість відображення зібраної інформації на дисплеї;
- забезпечення інтуїтивно зрозумілого керування для користувача з різним рівнем технічної підготовки.

Окрім функціональних характеристик, важливим аспектом є сукупність технічних вимог, які визначають апаратні та експлуатаційні параметри системи. Саме ці вимоги забезпечують відповідність пристрою умовам реального використання, зокрема в польових або несприятливих середовищах. До таких вимог відносяться:

- глибина виявлення, яка має забезпечувати детекцію дрібних металевих об'єктів (наприклад, монет, уламків, проводів) на глибині до 10–15 см, а більших – на глибині понад 20 см;

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.					Аналіз технічного завдання		
Перевір.							
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.		Осухівська Г.М.					
					Літ.	Арк.	Аркуші
						10	
					ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		

- чутливість до різних типів металів, зокрема як феромагнітних, так і кольорових, із можливістю хоча б базової класифікації або диференціації сигналів;
- автономність живлення, що передбачає використання енергоощадних компонентів і акумуляторів, здатних забезпечити безперервну роботу пристрою впродовж щонайменше 4–6 годин;
- стійкість до впливу зовнішніх чинників, зокрема температури, вологості, пилу та механічних навантажень, що дозволяє використовувати систему на відкритій місцевості в різних кліматичних умовах;
- ергономічність конструкції, що включає невелику масу, зручну форму корпусу, наявність тримача або штанги та комфортне розміщення елементів керування;
- наявність інтерфейсу індикації (екран та світлодіоди), які забезпечують візуалізацію даних про стан пристрою та результати виявлення в умовах денного освітлення.

Оскільки пристрій призначено для ручного або мобільного використання, особливу увагу слід приділити ергономіці конструкції. Загальна вага пристрою не повинна перевищувати 1.5 кг. Ручка або тримач мають бути зручними, з антиковзким покриттям. Інтерфейс управління має бути інтуїтивно зрозумілим, з мінімально необхідною кількістю кнопок. Також доцільно передбачити звукову індикацію з можливістю регулювання гучності.

1.2 Аналіз можливих рішень поставленого завдання

Пошук металевих предметів за допомогою електронних систем є технологічно розвиненою та багатоаспектною галуззю, що охоплює широкий спектр технічних рішень – від професійних промислових металодетекторів до спрощених аматорських або експериментальних приладів, створених ентузіастами. Ці системи знаходять застосування в археології, безпеці,

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

будівництві, пошуково-рятувальних роботах, а також у побуті. Основу роботи таких пристроїв становить реєстрація змін електромагнітного поля, спричинених присутністю провідних об'єктів у зоні дії детектора. Реалізація подібних систем істотно варіюється залежно від принципу дії, типу електронної схеми, способу аналізу сигналу, а також технічного рівня кінцевого користувача.

На сучасному етапі розвитку технологій виділяють кілька основних типів металодетекторів, зокрема: індукційні (PI – Pulse Induction), частотні (VLF – Very Low Frequency) та комбіновані або гібридні конструкції. Кожен із цих підходів має специфічні технічні переваги та обмеження, що обумовлюють доцільність їх використання у певних умовах. Індукційні системи, як правило, характеризуються простою конструкцією та високою глибиною проникнення сигналу, що робить їх ефективними для пошуку великих металевих об'єктів на значній глибині. Проте вони менш придатні для точної ідентифікації типу металу, оскільки сигнал має імпульсну природу й не містить достатньо інформації для спектрального аналізу.

Частотні системи працюють на основі неперервного гармонічного сигналу та здатні оцінювати фазові зміщення між переданим і прийнятим сигналом. Це дозволяє не лише виявити наявність металевих об'єктів, а й частково класифікувати його тип, що є критично важливим для вибіркового пошуку. Водночас VLF-системи мають складнішу електронну архітектуру та вимагають тонкого налаштування в залежності від умов середовища, що може ускладнити їх використання непідготовленим користувачем.

У свою чергу, останнім часом набули поширення мікропроцесорні металодетектори, які базуються на відкритих апаратних платформах – таких як Arduino, STM32, ESP32 тощо. Ці системи забезпечують розширену функціональність завдяки цифровій обробці сигналу, що включає фільтрацію шумів, підрахунок частоти коливань, зберігання історії виявлень, а також взаємодію з користувачем через дисплей, кнопки, Bluetooth або Wi-Fi. Такий

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

підхід дозволяє створювати більш гнучкі та програмовано розширювані конструкції, які здатні адаптуватися до конкретних умов використання без зміни апаратної частини. Усе це робить мікроконтролерні рішення особливо привабливими для розробки індивідуальних систем з відкритою архітектурою та можливістю масштабування функцій у майбутньому.

Металошукач MD-4030 Professional призначений для виявлення металевих предметів у ґрунті, піску, стінах чи інших середовищах із низькою провідністю. Його використовують як для побутових цілей (пошук монет, ювелірних виробів, побутових артефактів), так і для аматорських досліджень на відкритій місцевості (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд металошукача «MD-4030 Professional» [4]

Конструкція пристрою включає регульовану телескопічну штангу, блок управління з аналоговою шкалою індикації, а також динамік для звукового

сигналу при виявленні об'єкта. Пристрій використовує принцип індукційного балансу і має дискримінатор, що дозволяє частково фільтрувати сигнали від небажаних типів металів. Глибина виявлення становить близько 15–20 см для дрібних предметів і може сягати до 1 м для великих об'єктів. Металошукач живиться від батарей типу АА, є енергоощадним, простим у використанні та не потребує складного налаштування, що робить його популярним серед початківців.

Переваги MD-4030 Professional:

- простота у використанні, що робить його доступним для новачків;
- наявність базового дискримінатора для фільтрації небажаних сигналів [7];
- достатня глибина виявлення для побутових потреб (до 1 м для великих об'єктів);
- доступна ціна у порівнянні з більш просунутими моделями.

Недоліки MD-4030 Professional:

- відсутність цифрового інтерфейсу або дисплея;
- обмежена точність у розпізнаванні типу металу;
- недостатній рівень стабільності при роботі в мінералізованих ґрунтах [8];
- мінімальні можливості налаштування чутливості та індикації.

MD-4030 Professional є базовим аналоговим металошукачем, оптимальним для аматорського використання в простих умовах. Завдяки простоті конструкції та мінімальним вимогам до експлуатації він підходить для ознайомлення з принципами роботи металодетекторів, однак його функціональні можливості суттєво поступаються більш сучасним цифровим системам.

Металошукач GC-1069 SmartHunter є легким і простим цифровим пристроєм, призначеним для пошуку металу в ґрунті, піску, дрібній воді та інших подібних середовищах (рис. 1.2). Він орієнтований на аматорів та дітей

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

віком приблизно від 5 до 13 років, завдяки регульованій телескопічній штанзі макс. до 1,70 м, що дозволяє зручно адаптувати його під зріст користувача.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд металошукача «GC-1069 Smarthunter» [18]

Пристрій оснащений надійною водозахищеною котушкою діаметром близько 21,5 см, що дозволяє проводити пошук навіть у неглибокій воді . Окрім звукового сигналу, тут реалізовано індикацію за допомогою трьох тонів і двох LED-світлодіодів, що дозволяє розрізняти феромагнітні та неферомагнітні метали . Також доступна функція дискримінації, яка виключає небажані метали (наприклад, залізо) із процесу пошуку .

Універсальний режим "All Metal" дозволяє слідкувати за всіма знахідками, тоді як режим "Disc" забезпечує безпечніший і цілеспрямований пошук – наприклад, коштовностей. Чутливість можна регулювати вручну, що є важливим для адаптації до різних умов пошуку. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс із ЖК-дисплеєм відображає рівень заряду, глибину та чутливість.

Глибина виявлення залежить від розміру об'єкта: для монет і дрібних прикрас вона сягає до 20 см, для більших предметів – до 80 см . Пристрій важить близько 1 кг, працює від однієї 9 В батареї до 20 годин за використання з навушниками (близько 15 годин без), а також обладнаний роз'ємом для

підключення навушників 3,5 мм.

Переваги GC-1069 SmartHunter:

- наявність двох режимів пошуку (All Metal / Disc) з ручним налаштуванням чутливості [19];
- захищена від вологи котушка дозволяє працювати у вологому середовищі та на мілководді;
- інформативний LCD-дисплей із індикацією глибини, типу сигналу та заряду батареї;
- легка вага та регульована штанга, що підходить для дітей і підлітків.

Недоліки GC-1069 SmartHunter:

- обмежена глибина виявлення для дрібних об'єктів (до 20 см);
- недостатня точність у розпізнаванні кольорових металів;
- працює від однієї батареї 9В, що обмежує тривалість автономної роботи;
- пластиковий корпус і загальна конструкція не розраховані на інтенсивне професійне використання.

Загалом GC-1069 SmartHunter – це функціональний та доступний металошукач, який поєднує адаптовану механіку (регульовану штангу, водозахищеність), приємний для користувача інтерфейс і основні режими пошуку, що робить його привабливим у ролі вступного обладнання для молодих ентузіастів.

Металошукач Minelab Go-Find 22 поєднує легкість, зручність і базові можливості для пошуку металевих предметів (рис. 1.3). Його головне призначення – забезпечити простий і приємний «сімейний» або туристичний досвід пошуку: ви просто розкриваєте складну штангу, вмикаєте прилад і починаєте роботу. Завдяки вазі лише 1 кг, компактній складаній конструкції та водозахищеній котушці діаметром 8" він легко транспортується та підходить для використання на пляжах, у парках і навіть у неглибокій воді.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд металошукача «Minelab Go-Find 22» [9]

Інтерфейс приладу інтуїтивний: наявні два режими пошуку («All-Metal» і «Reject Iron»), три рівні чутливості, п'ять рівнів гучності та функція Easy-Trak, що автоматично налаштовує баланс ґрунту без складних мануальних операцій. Глибина виявлення досягає близько 20 см для монет та дрібних прикрас і до 80 см для більших металевих об'єктів. Дисплей показує індикацію глибини, типу металу за піктограмами (цвях, фольга, монета, перстень) й рівень заряду батареї, а також дозволяє підключати навушники через роз'єм 3,5 мм.

Переваги Minelab Go-Find 22:

- ультралекий і компактний дизайн – вага 1 кг та складана конструкція забезпечують високу мобільність [10];
- простий інтерфейс і попередньо встановлені режими – легко налаштовується й підходить навіть для новачків;
- автоматичне налаштування балансу ґрунту (Easy-Trak) – спрощує роботу в різних умовах, позбавляючи від необхідності ручного коригування;

– водозахищена котушка – дозволяє працювати на мілководді або в сирих умовах без побоювання за пошкодження.

Недоліки Minelab Go-Find 22:

- обмежена чутливість і глибина виявлення – до ~20 см для дрібних предметів, що може бути недостатньо для серйозних задач;
- відсутність розширеного розпізнавання типу металу (лише прості піктограми) – недостатньо для детального аналізу знахідок [11];
- працює від 4 АА батарейок – може бути обмеженням у тривалих польових сесіях без запасу живлення;
- відсутність розширених функцій, таких як бездротове підключення, програмований тон сигналу чи цифрова фільтрація.

Отже, Minelab Go-Find 22 – чудовий вибір для новачків і сімейних користувачів, які хочуть познайомитись з пошуком металу: він портативний, простий у використанні і надійний у стандартних умовах. Однак для глибокого пошуку, складного ґрунту чи професійного використання знадобляться більш просунуті моделі з розширеними функціональними можливостями.

Аналіз існуючих моделей металошукачів показав, що жодна з них не поєднує водночас достатню глибину виявлення, точну індикацію типу металу, адаптивність до різних умов середовища та відкритість до програмної модифікації. Більшість доступних пристроїв орієнтовані або на вузьке побутове застосування з обмеженою функціональністю, або є надто складними для самостійного відтворення. У той же час, сучасні мікроконтролерні платформи дають змогу реалізувати комп'ютеризовану систему, яка б задовольняла вимоги до гнучкості, масштабованості та автономності. Це обґрунтовує необхідність розробки нової системи, що поєднає апаратну простоту з можливістю цифрового аналізу та подальшого вдосконалення.

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка узагальненої структури комп'ютеризованої системи

Процес розробки комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів передбачає визначення логічної та функціональної організації основних апаратних компонентів, які забезпечують злагоджену взаємодію між сенсорною частиною, керуючим модулем і системою індикації. Узагальнена структура системи формується з урахуванням вимог до глибини виявлення, надійності роботи, енергоефективності, простоти конструкції та можливості подальшого розширення функцій. Основна ідея полягає у побудові компактного пристрою з мінімально необхідним набором функціональних блоків, здатних забезпечити виявлення металів з подальшою обробкою та відображенням результатів.

На рисунку 2.1 подано структурну схему комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів, яка реалізується на базі мікроконтролера Arduino Nano.

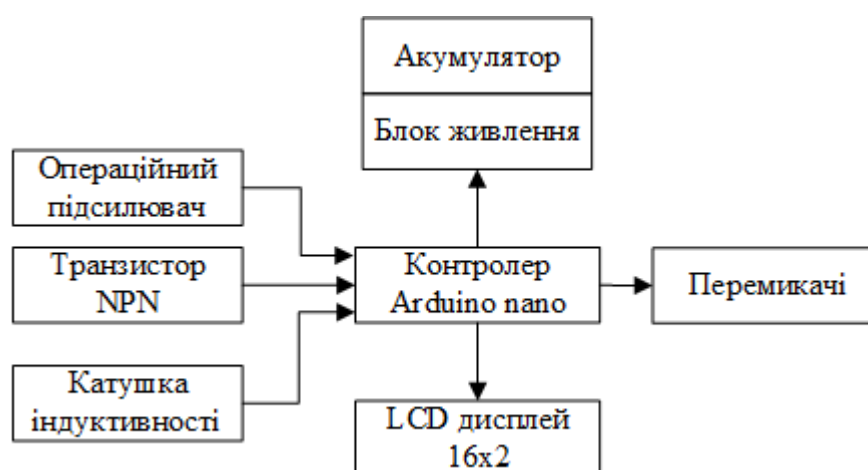


Рисунок 2.1 – Структурна схема пристрою

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.					Проектна частина		
Перевір.							
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.	Осухівська Г.М.						
					Літ.	Арк.	Аркушів
						19	68
					ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		

Згідно з поданою схемою, центральним елементом системи є контролер Arduino Nano, який виконує функції аналізу сигналів, керування режимами роботи та виведення інформації на екран. До входів мікроконтролера під'єднано катушку індуктивності, яка слугує сенсорним елементом для виявлення металевих предметів. Її сигнал підсилюється з використанням транзистора NPN та операційного підсилювача, що дозволяє стабільно фіксувати зміну індуктивних характеристик при наближенні металу.

Контролер обробляє підсилений сигнал, визначає наявність об'єкта та передає відповідну інформацію на LCD дисплей 16×2, який використовується для виводу результатів виявлення, індикації режиму або рівня чутливості. Для забезпечення автономної роботи пристрою використовується блок живлення, який отримує енергію від акумулятора. Це дозволяє пристрою функціонувати в польових умовах без потреби зовнішнього джерела енергії.

Окрім того, система містить перемикачі, які під'єднані до цифрових входів контролера. Вони забезпечують зміну режимів роботи або рівня чутливості без потреби перепрошивки пристрою, що є зручним з погляду експлуатації. Завдяки цій структурі реалізується гнучка, енергоефективна і достатньо проста у відтворенні система, яка поєднує базову аналогову електроніку з цифровим аналізом даних на основі Arduino.

Для реалізації узагальненої структури комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів необхідно перейти до формалізації електричних взаємозв'язків між її функціональними компонентами. Принципова електрична схема відіграє ключову роль у забезпеченні працездатності пристрою, оскільки відображає конкретну реалізацію функціональних блоків, що були визначені на етапі структурного моделювання. На рисунку 2.2 наведено повну принципову схему пристрою, що охоплює сенсорну, підсилювальну, обчислювальну та індикаційну частини.

					<i>КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

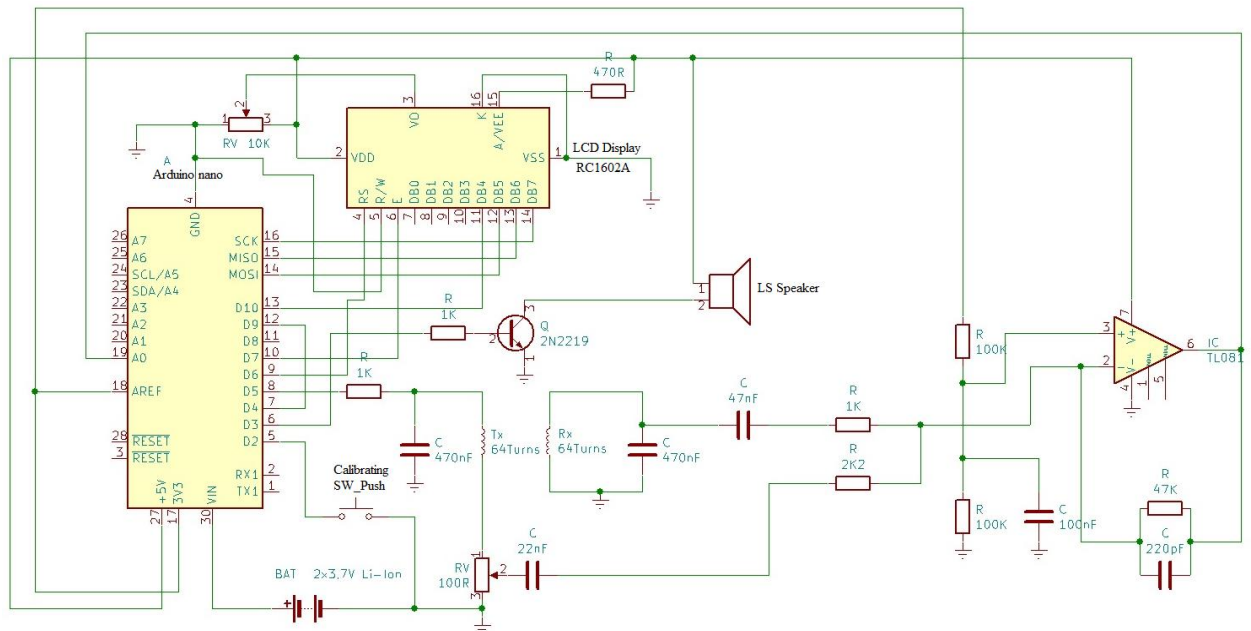


Рисунок 2.2 –Схема електрична принципова

Основою електронної частини пристрою є мікроконтролер Arduino Nano, який обробляє сигнали, що надходять із LC-генератора, та керує виведенням даних на LCD-дисплей типу 1602A, підключений через паралельний інтерфейс. Для калібрування системи використовується кнопка Calibrating SW_Push, яка з'єднана з одним із цифрових входів контролера та дозволяє ініціювати обнулення чи оновлення нульової частоти вільного колювання.

Коливальний контур реалізовано за допомогою котушки з 64 витками (Tx) та конденсатора ємністю 22 нФ, що формує частотозалежну частину резонансного генератора. Цей контур керується через транзистор 2N2219, який працює в режимі ключа. Зміна індуктивності внаслідок наближення металевого предмета змінює резонансну частоту, що відстежується контролером.

Сигнал з LC-контурної частини подається на операційний підсилювач TL081, який працює як широкопasmовий підсилювач змінного струму. Його конфігурація включає зворотній зв'язок із частотно-залежними RC-елементами, що дозволяє фільтрувати шум і посилювати саме корисний

сигнал. Вихід підсилювача з'єднано з Arduino, що аналізує зміни частоти або тривалості імпульсів і на їх основі формує відповідну реакцію пристрою.

У схемі також присутній динамік (LS Speaker), який генерує звуковий сигнал при виявленні об'єкта. Живлення пристрою здійснюється від двох Li-Ion акумуляторів (по 3,7 В), що забезпечують стабільне функціонування системи. Живлення мікроконтролера та інших компонентів стабілізується внутрішніми схемами Arduino Nano.

У цілому ця схема дозволяє реалізувати повноцінну комп'ютеризовану систему виявлення металевих предметів з відображенням даних на дисплеї, звуковою сигналізацією, можливістю калібрування та програмною адаптацією чутливості. Синтез аналогових та цифрових елементів у межах однієї конструкції забезпечує надійність, гнучкість і адаптивність пристрою до умов експлуатації.

2.2 Обґрунтування вибору апаратного забезпечення комп'ютеризованої системи

Безпосереднє визначення складу апаратного забезпечення становить один із методологічно значущих етапів розробки комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів. Саме від характеристик апаратної частини залежить здатність пристрою до реєстрації фізичних змін, викликаних наявністю металевих об'єктів у зоні дії сенсорів, а також точність і надійність цифрової обробки сигналів, коректність інтерпретації результатів і стійкість функціонування системи в різних експлуатаційних умовах. Конструктивно апаратна конфігурація повинна забезпечувати узгоджену роботу між сенсорною підсистемою, підсилювальними каскадами, джерелом живлення, модулями виведення інформації та центральним керувальним елементом системи.

Процес формування компонентної бази вимагає урахування низки

					<i>КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

техніко-експлуатаційних параметрів, зокрема рівня споживання енергії, компактності, технологічної сумісності, доступності на ринку, супроводу у вигляді технічної документації, а також можливостей для модифікації та масштабування системи. Центральна роль у загальній архітектурі належить обчислювальному модулю, який виконує обробку даних, реалізує алгоритмічну частину виявлення та координує роботу периферійних елементів через відповідні інтерфейси. У зв'язку з цим, доцільно провести поглиблений аналіз функціональних і технічних характеристик доступних типів контролерів з метою їхньої раціональної інтеграції до проєктованого пристрою.

Серед наявних на ринку мікроконтролерів, що відповідають технічним і експлуатаційним вимогам до розроблюваної системи, доцільно зосередити увагу на платі Arduino Nano. Цей модуль базується на мікроконтролері ATmega328P і вирізняється надзвичайно компактними габаритами, що забезпечують зручність інтеграції до конструкцій зі складною топологією або обмеженим простором. На рисунку 2.3 подано зовнішній вигляд плати, який демонструє лаконічне компонування елементної бази, наявність цифрових і аналогових входів/виходів, а також мікро-USB-порт.

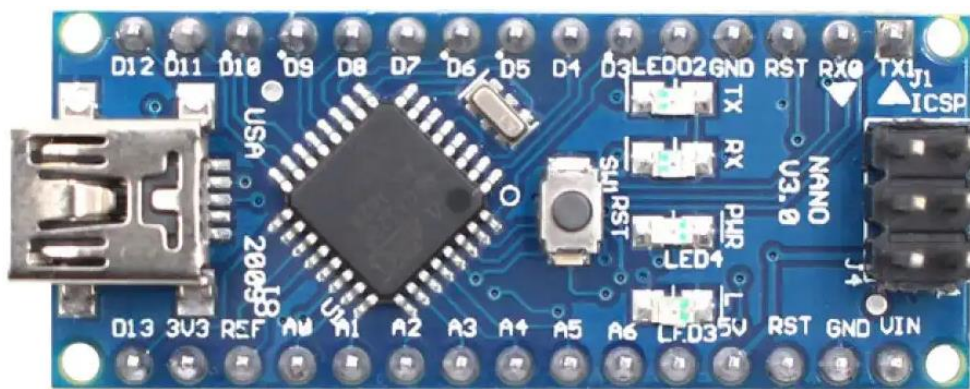


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд контролера «Arduino nano» [1]

Arduino Nano активно використовується в широкому спектрі вбудованих застосувань – від сенсорних вузлів у системах інтернету речей до автономних

модулів у портативних приладах, зокрема й тих, що орієнтовані на пошук металевих предметів. Її ключові переваги включають низький рівень енергоспоживання, підтримку стандартних бібліотек Arduino IDE, а також повну сумісність із численними модулями й датчиками, що суттєво спрощує розгортання як апаратної, так і програмної частини системи.

Окрім цього, Arduino Nano вирізняється стабільною роботою в режимах зчитування аналогових сигналів, що є критично важливим для подальшої обробки слабких сигналів від індуктивного сенсора. Її доступність, документаційна підтримка й активна спільнота розробників забезпечують швидке прототипування та адаптацію під конкретні умови функціонування комп'ютеризованої системи.

Мікроконтролер MSP430G2231, розроблений компанією Texas Instruments належить до наднизькопотужного сімейства MSP430, що спеціально орієнтоване на застосування в енергоефективних вбудованих пристроях. Його архітектура побудована на 16-розрядному ядрі RISC, яке забезпечує високу швидкодію при мінімальному енергоспоживанні, що особливо важливо для портативних або автономних систем. На рисунку 2.4 наведено зовнішній вигляд модуля з мікроконтролером MSP430G2231, реалізованого у вигляді компактної плати з інтегрованим кварцовим генератором, виводами для підключення периферії, а також інтерфейсом для налагодження й програмування за допомогою роз'єму Spy-Bi-Wire.

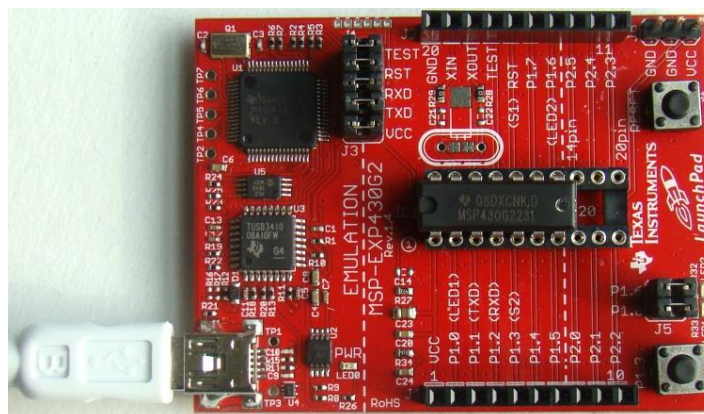


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд контролера «MSP430G2231» [12]

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Основними технічними характеристиками MSP430G2231 є: тактова частота до 16 МГц, наявність 2 КБ енергонезалежної пам'яті Flash, 128 Б оперативної пам'яті RAM, а також вбудовані модулі АЦП, таймери та цифрові входи/виходи. Незважаючи на обмежений об'єм пам'яті, контролер має достатню обчислювальну потужність для реалізації базових алгоритмів виявлення, обробки аналогових сигналів від сенсорів і керування індикацією.

Завдяки підтримці наднизького споживання енергії (режими LPM – Low Power Mode), MSP430G2231 доцільно використовувати у пристроях, що працюють від батарейок або вимагають тривалого автономного режиму. Розвинене середовище розробки Code Composer Studio та велика база прикладів сприяють прискоренню реалізації прикладного програмного забезпечення. З огляду на наведене, мікроконтролер MSP430G2231 може розглядатися як ефективна альтернатива для побудови малогабаритних і енергозберігаючих систем виявлення металевих об'єктів.

Серед варіантів високопродуктивних обчислювальних платформ, які можуть бути використані в контексті створення комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів, особливу увагу заслуговує одноплатний комп'ютер Raspberry Pi. Цей пристрій вирізняється суттєвою обчислювальною потужністю, розширеними комунікаційними можливостями та підтримкою повноцінних операційних систем на базі ядра Linux, що дозволяє реалізовувати не лише алгоритми обробки сенсорних даних, але й складні функції аналізу, візуалізації та передачі інформації.

На рисунку 2.5 подано зовнішній вигляд однієї з найпоширеніших моделей Raspberry Pi, яка містить процесорний модуль, блок живлення, модулі оперативної пам'яті, графічне ядро, слоти для зберігання даних та розвинуту систему входів/виходів, включаючи 40-контактний GPIO-роз'єм.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд контролера «Raspberry Pi» [15]

Однією з головних переваг цієї платформи є підтримка широкого спектра периферійних пристроїв – від аналогових і цифрових сенсорів до камер, дисплеїв та бездротових модулів (Wi-Fi, Bluetooth). Raspberry Pi підтримує інтерфейси I2C, SPI, UART, що забезпечує гнучке підключення компонентів різного типу. У контексті задачі пошуку металевих предметів використання Raspberry Pi дозволяє реалізовувати не тільки низькорівневу обробку вхідних сигналів, а й складні програмні функції – фільтрацію шумів, зберігання результатів, хмарну передачу даних або машинне навчання.

Завдяки високій частоті центрального процесора (до 1.8 ГГц) та обсягу оперативної пам'яті (до 8 ГБ), Raspberry Pi значно перевершує традиційні мікроконтролери за ресурсами, що відкриває нові можливості для розробки адаптивних, мережевих та інтелектуальних систем виявлення. Окрім того, активна спільнота користувачів, велика база відкритих бібліотек і технічної документації сприяє прискореному розгортанню як дослідницьких, так і промислових прототипів.

З огляду на різноманіття можливих варіантів апаратного забезпечення для побудови обчислювального ядра комп'ютеризованої системи, доцільним є проведення порівняльного аналізу декількох представників

мікроконтролерних і одноплатних рішень, кожне з яких має свої переваги в певних аспектах реалізації. При цьому особливу увагу слід звернути на такі ключові технічні параметри, як компактність, енергоспоживання, простота інтеграції, підтримка стандартних інтерфейсів, наявність програмного середовища, час реакції на аналогові сигнали та зручність у налагодженні й програмуванні. У таблиці 2.1 наведено порівняння базових характеристик трьох платформ: Arduino Nano, MSP430G2231 та Raspberry Pi.

Таблиця 2.1 – Порівняння технічних характеристик апаратних платформ

Характеристика	Arduino Nano	MSP430G2231	Raspberry Pi
Архітектура	8-розрядна AVR (ATmega328P)	16-розрядна RISC	64-розрядна ARM Cortex-A
Робоча частота	16 МГц	до 16 МГц	до 1.8 ГГц
Об'єм Flash-пам'яті	32 КБ	2 КБ	до 32 ГБ
Об'єм оперативної пам'яті (RAM)	2 КБ	128 Б	до 8 ГБ
Живлення	5 В	1.8–3.6 В	5 В
Енергоспоживання	Низьке	Дуже низьке	Високе
Інтерфейси введення/виведення	14 цифрових, 8 аналогових	10 GPIO	40 GPIO
АЦП (кількість розрядів)	10-біт	10-біт	Зовнішній (через модуль)
Наявність внутрішнього стабілізатора	Так	Ні	Так
Простота прототипування	Висока	Середня	Висока (через підтримку Linux)
Сумісність з Arduino IDE	Повна	Обмежена	Відсутня
Підтримка бібліотек та спільноти	Широка	Менша	Широка
Габарити	Дуже компактні	Компактні	Відносно великі

З урахуванням наведених у таблиці характеристик, Arduino Nano

виявляється найбільш збалансованим рішенням для реалізації комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів. Вона поєднує достатню продуктивність для обробки аналогових сигналів із простотою інтеграції та підтримкою широкого спектра бібліотек і периферії. Завдяки компактним габаритам та наявності вбудованого стабілізатора живлення плата легко вбудовується до портативних конструкцій. Також важливою перевагою є повна сумісність із середовищем Arduino IDE, що забезпечує оперативну розробку та налагодження програмного забезпечення.

Вибір обчислювального модуля створює передумови для формування всієї апаратної конфігурації системи, оскільки саме обраний контролер визначає сумісність і спосіб взаємодії з іншими функціональними компонентами. На цьому етапі доцільно здійснити обґрунтований підбір периферійних елементів, необхідних для забезпечення стабільної роботи сенсорної частини, підсилювальних каскадів, індикаторних засобів та джерел живлення. Особливу увагу варто приділити підсистемі виведення інформації, яка повинна забезпечити зручне, наочне та оперативне відображення результатів роботи пристрою.

З цією метою в проєктованій системі передбачається використання дисплея, який виконує функцію інтерфейсу між користувачем і пристроєм, дозволяючи в реальному часі контролювати стан пошуку металевих об'єктів, фіксувати зміни параметрів сигналу та отримувати повідомлення про виявлення цілей. У контексті компактних систем з обмеженим енергоспоживанням особливо актуальним є застосування символьних рідкокристалічних індикаторів, які забезпечують високу контрастність, зручність зчитування даних та невеликі габарити.

У таблиці 2.2 представлено порівняльний аналіз трьох дисплейних модулів, які можуть бути інтегровані в апаратну структуру системи: LCD1602, OLED 0.96" I2C та TFT 1.8". Наведене порівняння охоплює ключові технічні параметри, що мають визначальний вплив на вибір індикаційного модуля в

					<i>КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умовах обмежених апаратних ресурсів.

Таблиця 2.2 – Порівняння характеристик дисплейних модулів для вбудованих систем

Характеристика	LCD1602	OLED 0.96" I2C	TFT 1.8"
Тип дисплея	РК, символний	OLED, графічний	TFT, графічний
Роздільна здатність	16×2 символи	128×64 пікселі	160×128 пікселів
Інтерфейс підключення	I2C або паралельний	I2C	SPI
Споживана потужність	Низька	Середня	Вища
Контрастність	Висока	Дуже висока	Середня
Кількість кольорів	Монохром	Монохром	До 65 тис.
Зручність читання з відстані	Висока	Обмежена	Залежить від кута огляду
Габарити	Компактні	Дуже компактні	Відносно великі
Простота інтеграції	Висока	Висока	Середня
Потреба в графічному контролері	Відсутня	Потребує	Потребує

З урахуванням вимог до низького енергоспоживання, простоти підключення та надійного відображення інформації в реальному часі, модуль LCD1602 є доцільним вибором для розроблюваної системи. Його символна структура забезпечує достатній обсяг для виведення ключових повідомлень, таких як рівень сигналу або наявність металевого об'єкта, без потреби в додатковому графічному контролері. Інтерфейс I2C дозволяє зменшити кількість задіяних виводів мікроконтролера, що особливо актуально в умовах обмеженого ресурсу портів. Висока контрастність і зручність зчитування з різних кутів робить цей дисплей придатним для використання у портативних пристроях, які експлуатуються в польових умовах.

LCD1602 – це символний рідкокристалічний дисплей, призначений для відображення текстової інформації у два рядки по 16 символів кожен (рис. 2.6).

Він належить до найбільш поширених індикаторних модулів, що використовуються у вбудованих системах, навчальних проектах, прототипах пристроїв інтернету речей, побутовій автоматизації та контрольно-вимірювальній апаратурі. Дисплей побудований на основі контролера HD44780, який підтримує як паралельний інтерфейс, так і I2C-варіанти підключення, що забезпечує гнучкість у застосуванні й сумісність з більшістю мікроконтролерів, зокрема з Arduino Nano.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд LCD1602 [6]

Основною перевагою LCD1602 є здатність до зручного виведення символної інформації без потреби у використанні зовнішніх графічних процесорів або складної ініціалізації. Він не відображає графіки чи зображення, проте ідеально підходить для показу текстових повідомлень, числових значень параметрів, повідомлень про стан системи, тощо. У межах проєктованої комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів LCD1602 виконує роль інформаційного інтерфейсу між пристроєм і користувачем, відображаючи в реальному часі такі дані, як рівень сигналу, статус пошуку, спрацювання сенсора або повідомлення про виявлення об'єкта.

Завдяки високій контрастності та стабільній роботі при живленні 5 В,

дисплей забезпечує чітке зображення навіть в умовах змінного освітлення, що є критично важливим для пристроїв, які експлуатуються поза лабораторним середовищем. Крім того, невеликі габарити та мала маса LCD1602 дозволяють зручно інтегрувати його в корпус портативної системи без значного впливу на конструктивні параметри пристрою.

Операційний підсилювач TL081 – це високоякісний аналоговий компонент, який належить до класу JFET-вхідних операційних підсилювачів загального призначення (рис. 2.7). Його основними технічними характеристиками є висока вхідна імпедансність, низький рівень шумів, широкий діапазон живлення (від ± 3 В до ± 18 В) та високий коефіцієнт підсилення відкритого контуру. Завдяки цим властивостям TL081 широко використовується в аналогових схемах, що потребують точного підсилення слабких сигналів, зокрема в аудіообладнанні, вимірювальних пристроях, сенсорних системах та індуктивних детекторах.

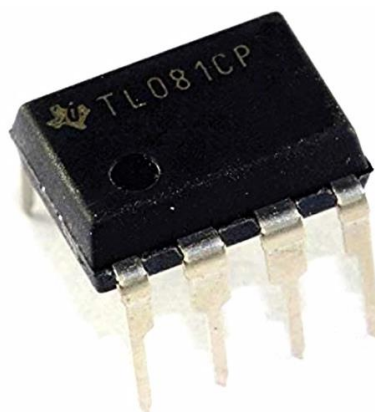


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд операційного підсилювача TL081 [17]

У межах проєктованої комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів TL081 виконує критично важливу функцію – підсилення сигналу, що надходить від чутливої індуктивної котушки, яка реагує на зміну магнітного поля поблизу металевих об'єктів. Оскільки сигнал з первинного сенсора має дуже малу амплітуду і може бути зашумленим, необхідно підвищити його рівень до такого, що буде придатним для подальшої обробки

мікроконтролером. TL081 забезпечує необхідне посилення без істотного внесення спотворень, зберігаючи при цьому стабільність амплітуди та точність відтворення вхідного сигналу.

Крім того, цей підсилювач характеризується стабільною температурною поведінкою та низьким споживанням струму, що дозволяє використовувати його в енергоощадних мобільних системах. Завдяки широкому частотному діапазону і високій швидкості наростання вихідного сигналу TL081 дозволяє коректно передавати як низькочастотні зміни сигналу, так і високочастотні пульсації, які є характерними для змін індуктивного поля. Таким чином, інтеграція цього підсилювача до апаратної частини системи є необхідною умовою для забезпечення високої чутливості та точності функціонування пристрою.

BC547 – це кремнієвий NPN-біполярний транзистор загального призначення, який широко використовується в аналогових і цифрових електронних пристроях (рис. 2.8). Він характеризується середнім коефіцієнтом підсилення струму (h_{FE}) у межах від 110 до 800, низьким рівнем власного шуму, максимальною напругою колектор-емітер до 45 В і здатністю комутувати струми до 100 мА. Завдяки поєднанню компактності, енергоефективності та технологічної доступності BC547 є одним з найпоширеніших елементів у схемах попереднього підсилення, логічного керування та перемикання низькопотужних навантажень.

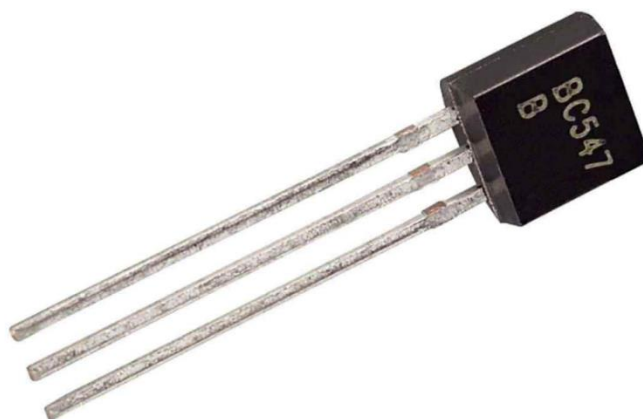


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд транзистора TL081 [2]

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

У межах комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів транзистор BC547 може виконувати функцію ключового елемента, який комутує живлення звукового оповіщувача (динаміка) або індикаційного елемента на основі цифрового сигналу, сформованого мікроконтролером. При виявленні металевого об'єкта мікроконтролер генерує керуючий сигнал на базу транзистора, внаслідок чого відкривається колекторний канал і до виконавчого елемента підключається джерело живлення. Такий спосіб забезпечує гальванічну розв'язку, дозволяє керувати елементами з вищим споживаним струмом, ніж здатен надати мікроконтролер напряму, а також підвищує надійність і стабільність роботи пристрою.

BC547 також може застосовуватися в каскадах підсилення сигналу до рівня, необхідного для наступних логічних або аналогових обробок, особливо у випадках, коли від операційного підсилювача надходить слабкий імпульсний сигнал. Його високий коефіцієнт підсилення та швидка реакція на зміну вхідного струму забезпечують точне керування зовнішніми модулями при мінімальних затримках. З огляду на перелічені властивості, BC547 є доцільним вибором для реалізації ключових функціональних вузлів у межах проєктованої системи.

Динамік КУ-006 – це компактний електромагнітний звуковий модуль, який призначений для генерації звукових сигналів у низьковольтних мікропроцесорних системах (рис. 2.9). Він складається із п'єзоелектричного або електромагнітного перетворювача, змонтованого на стандартній платі з трьома контактами: живлення, земля та сигнальний вхід. Завдяки малій потужності споживання, простоті підключення та можливості керування звуковою частотою через PWM-сигнали, модуль КУ-006 широко використовується в навчальних платформах, вбудованих системах сповіщення, сигналізаціях та пристроях взаємодії з користувачем.



Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд динаміка KY-006 [5]

У структурі комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів модуль KY-006 виконує функцію акустичної індикації виявлення металевих об'єктів. Після обробки сигналу від сенсора та прийняття рішення про спрацювання, мікроконтролер формує імпульсний сигнал на вході динаміка, в результаті чого генерується звуковий тон певної частоти. Це дозволяє користувачеві оперативно реагувати на події, не відволікаючись на постійне візуальне спостереження за дисплеєм. Частота та тривалість звукового сигналу можуть змінюватися залежно від відстані до об'єкта або його розміру, що відкриває можливість реалізації градаційного звукового зворотного зв'язку.

Перевагою використання KY-006 є його повна сумісність із платформами Arduino, що дозволяє легко інтегрувати модуль у програмно-апаратну структуру системи без додаткових схемотехнічних елементів. Завдяки малій масі та компактним розмірам, динамік легко монтується в корпус портативного пристрою, не створюючи механічних чи акустичних перешкод. Таким чином, модуль KY-006 забезпечує ефективний канал зворотного зв'язку між системою та користувачем, підвищуючи функціональну зручність експлуатації.

Конденсатор типу K73-17 є поліпропіленовим конденсатором із металізованою плівкою, що призначений для роботи в колах змінного та

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

імпульсного струму з підвищеними вимогами до стабільності параметрів і довговічності (рис. 2.10). Завдяки своїй конструкції, яка передбачає використання металізованого поліпропілену як діелектрика, ці конденсатори характеризуються низьким тангенсом кута діелектричних втрат, високою стабільністю ємності в широкому температурному діапазоні, а також відмінною стійкістю до тривалого електричного навантаження. Конденсатори К73-17 виробляються з різними номінальними ємностями, типовими значеннями від 1 нФ до кількох мкФ, і можуть витримувати напругу до 630 В, що робить їх придатними як для високочастотних, так і для енергетичних застосувань.



Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд конденсатора К73-17

У контексті комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів конденсатор К73-17 виконує одну з ключових ролей у фільтраційних і резонансних колах, зокрема в колі, що формує генераторний контур або фільтрує високочастотні перешкоди. У поєднанні з індуктивним елементом (котушкою) він може бути використаний для створення коливального контуру з фіксованою резонансною частотою, що дозволяє системі реагувати на зміну електромагнітного поля поблизу металевих об'єктів. Крім того, К73-17 забезпечує ефективне згладжування імпульсних завад, які можуть виникати внаслідок перемикання або дії зовнішніх електромагнітних впливів, тим самим стабілізуючи сигнал на вході підсилювального каскаду.

Серед переваг К73-17 варто також зазначити тривалий термін служби,

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високу надійність у циклічному режимі роботи та стійкість до температурних коливань, що робить його придатним для використання в портативних системах, які експлуатуються в нестабільних зовнішніх умовах. Його компактна форма і стандартне виведення забезпечують зручність монтажу як у макетних схемах, так і в друкованих платах серійних пристроїв. У результаті, застосування конденсатора K73-17 у складі пристрою дозволяє досягти необхідного рівня фільтрації, частотної селективності та стабільності функціонування електронних вузлів системи.

2.3 Обґрунтування вибору програмного забезпечення комп'ютеризованої системи

У процесі розробки комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів надзвичайно важливим є не лише вибір апаратної частини, але й програмного забезпечення, яке забезпечуватиме належне функціонування пристрою, керування сенсорами, обробку сигналів та інтерфейс взаємодії з користувачем. Вибране середовище розробки має бути сумісним з обраною апаратною платформою, підтримувати необхідні бібліотеки, бути зручним для налагодження, а також дозволяти масштабування та подальшу модифікацію програмного коду. Особливу роль у цьому відіграє доступність документації, стабільність середовища, а також активність спільноти, яка спрощує процес розробки та усунення потенційних помилок.

У межах даної системи основним програмним інструментом виступає Arduino IDE – офіційне середовище розробки для платформ на базі мікроконтролерів AVR. Воно підтримує мову програмування, що базується на C/C++, має вбудовану систему компіляції, автоматичне виявлення плати та дозволяє безпосередньо завантажувати скетчі у пам'ять контролера через USB. Arduino IDE вирізняється своєю простотою, широкою базою бібліотек та активною спільнотою, що робить його придатним як для початкових, так і для

більш складних проєктів. Середовище має кросплатформену підтримку (Windows, Linux, macOS), що забезпечує зручність використання незалежно від операційної системи розробника. Крім того, Arduino IDE дозволяє легко розширювати функціональність через підключення зовнішніх бібліотек, що істотно прискорює розробку типових алгоритмів сенсорного зчитування, обробки сигналів та керування виконавчими елементами.

Однією з альтернатив Arduino IDE є середовище PlatformIO, яке працює як розширення до Visual Studio Code та підтримує мультиплатформенну розробку. Воно дозволяє керувати бібліотеками, проєктами, середовищами та профілями компіляції в більш структурованому вигляді, а також підтримує складні конфігурації з кількома платами в одному проєкті. Крім того, PlatformIO забезпечує потужні засоби відлагодження, що корисно для складніших вбудованих систем.

Ще одним програмним інструментом є Atmel Studio (тепер Microchip Studio), який призначений для розробки під AVR і SAM мікроконтролери від Microchip. Це повноцінне середовище, що базується на Visual Studio та підтримує як асемблерну, так і мовну розробку на C/C++, надаючи детальний доступ до реєстрів та апаратної структури мікроконтролера. Водночас його складність і ресурсомісткість можуть бути надлишковими для невеликих проєктів, однак воно доцільне для задач, які вимагають точного контролю над кожним етапом виконання коду.

Зважаючи на необхідність забезпечення стабільного програмного супроводу для комп'ютеризованої системи, доцільним є порівняння доступних середовищ розробки за низкою ключових технічних та експлуатаційних характеристик. Такий підхід дозволяє системно оцінити не лише функціональні можливості кожного інструменту, але й його придатність до використання в умовах проєктування портативного пристрою з обмеженими апаратними ресурсами. З метою уніфікації аналізу у таблиці 2.3 наведено порівняльні характеристики розглянутих середовищ програмування.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.3 – Порівняння технічних характеристик апаратних платформ

Характеристика	Arduino IDE	PlatformIO	Microchip Studio
Сумісність із Arduino Nano	Повна	Повна	Часткова (через інші тулчейни)
Простота встановлення	Висока	Середня	Низька
Інтерфейс користувача	Мінімалістичний та зручний	Розширений (на базі VS Code)	Складний (на базі Visual Studio)
Підтримка бібліотек	Вбудована, централізована	Висока, але потребує конфігурації	Обмежена для сторонніх платформ
Швидкість компіляції	Висока для простих проєктів	Висока (залежить від середовища)	Нижча, через складність тулчейну
Вимоги до апаратного забезпечення	Низькі	Помірні	Високі
Підтримка багатоплатформності	Часткова	Повна	Обмежена
Мова програмування	C/C++	C/C++, Python (інтеграція)	C/C++, Assembler

Враховуючи наведені у таблиці характеристики, Arduino IDE є раціональним вибором для розробки програмного забезпечення комп'ютеризованої системи на базі контролера Arduino Nano. Середовище забезпечує швидке налаштування, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і централізовану підтримку бібліотек, що суттєво спрощує розгортання типових функціональних модулів. Його низькі вимоги до апаратних ресурсів дозволяють використовувати IDE навіть на малопотужних комп'ютерах без втрати продуктивності. Висока активність спільноти та велика кількість документації забезпечують розробникові доступ до типових прикладів, рішень та підтримки. Усе це робить Arduino IDE оптимальним середовищем для ефективної розробки, тестування та налагодження вбудованих систем невисокої складності.

2.4 Проектування комп'ютеризованої системи

Процес проектування комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів охоплює комплекс дій, спрямованих на формалізацію логіки роботи пристрою, визначення структури обробки сигналів, послідовності взаємодії між апаратними та програмними компонентами, а також створення алгоритмічної моделі функціонування [22].

На рисунку 2.11 зображено блок-схему алгоритму роботи комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів, яка відображає основні етапи виконання програмного коду пристрою, починаючи з ініціалізації та завершуючи відображенням результатів на індикаторі. Структура алгоритму має циклічний характер і забезпечує безперервну обробку вхідних сигналів та інтерактивну взаємодію з користувачем через елементи керування.

Алгоритм розпочинається з фази ініціалізації, у ході якої здійснюється налаштування LCD-дисплея та BarGraph-індикатора, конфігурація вхідних/вихідних пінів мікроконтролера, а також запуск таймерів, які використовуються для подальшого збору і обробки даних. Після цього система переходить у нескінченний цикл `while(true)`, у межах якого здійснюється опитування стану енкодера. У випадку виявлення натискання кнопки енкодера активується процедура калібрування – користувацький режим, у якому пристрій адаптує параметри вимірювання до конкретного середовища або умов експлуатації.

Якщо ж кнопка не натиснута, система переходить до обробки вхідного сигналу з сенсора. Цей етап включає попереднє перетворення та фільтрацію сигналу, розрахунок бінів, а також обчислення таких характеристик, як амплітуда та фаза сигналу. Після цього здійснюється перевірка: якщо амплітуда перевищує визначений пороговий рівень, система переходить до класифікації типу металевих об'єктів – чорний чи кольоровий метал.

Результати аналізу негайно відображаються на LCD-дисплеї для інформування користувача.

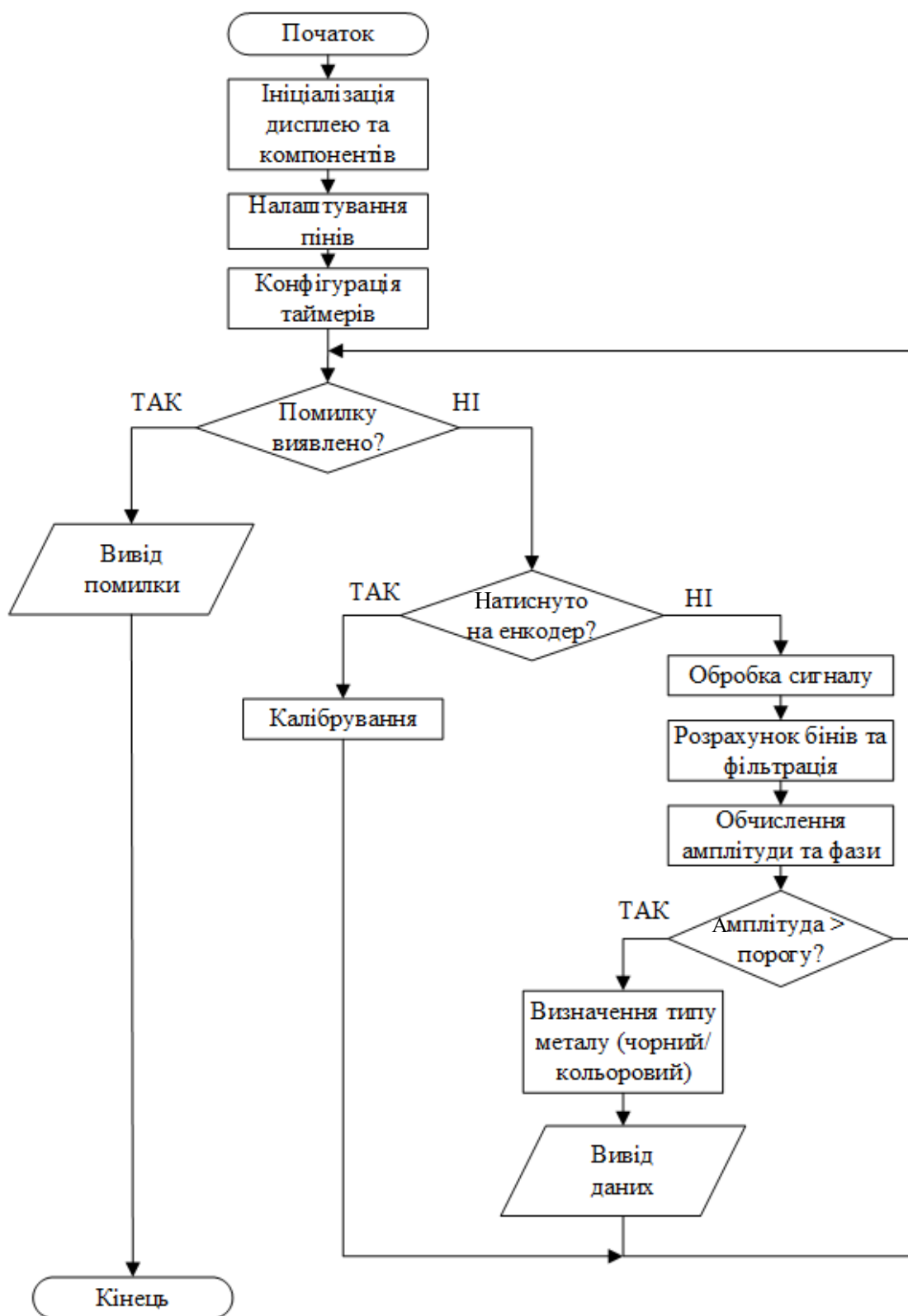


Рисунок 2.11 – Блок- схема алгоритму роботи пристрою

Завдяки такій структурі алгоритм забезпечує інтерактивність, можливість ручного налаштування, а також автоматичне реагування на зміни вхідних фізичних параметрів, що підвищує точність і зручність експлуатації пристрою в реальному середовищі.

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Реалізація проєктного рішення

Здійснено програмну реалізацію функціональних компонентів системи з урахуванням попередньо визначених апаратних параметрів та алгоритмічної структури. Код охоплює процедури ініціалізації дисплейного модуля, конфігурацію таймерів, а також підготовку до обробки аналогових сигналів. Реалізовано підключення бібліотек для роботи з LCD-дисплеєм формату 16×2 та модулем виведення гістограми, що дозволяє поєднати символну та візуальну індикацію.

На рисунку 3.1 подано фрагмент початкового коду, який визначає базові параметри взаємодії з периферією та конфігурацію таймерного підсистеми мікроконтролера.

```
#include <LiquidCrystal.h> // Підключення бібліотеки для роботи з LCD 16x2
#include <LcdBarGraph.h> // Бібліотека для відображення графіка на LCD
#define max_ampAverage 200 // Максимальне значення амплітуди, що відображається на шкалі
// Ініціалізація LCD-екрана (використовуються піни RS=6, E=7, D4-D7=10-13)
LiquidCrystal lcd(6, 7, 10, 11, 12, 13);
LcdBarGraph lbg(&lcd, 16, 0, 1); // Вивід графіка на нижній рядок дисплея
#define TIMER1_TOP (259) // Верхня межа лічильника таймера 1 (для 62.5 кГц сигналу)
#define USE_3V3_AREF (1) // Якщо живлення через USB – використовуємо 3.3V як опорну напругу для АЦП
```

Рисунок 3.1 – Ініціалізація компонентів системи

У цьому фрагменті застосовано бібліотеку LiquidCrystal для зв'язку з дисплеєм, а також LcdBarGraph для формування умовної шкали амплітуди у нижньому рядку. Ініціалізація LCD здійснюється через цифрові піни з фіксованим розташуванням, а шкала будується на основі заданого граничного значення амплітуди. Окремо визначено верхню межу лічильника таймера, що використовується для формування частоти несучого сигналу, та обрано режим

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Практична частина			Лім.	Арк.	Аркушів	
Розроб.											
Перевір.										42	68
Реценз.								ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41			
Н. Контр.											
Затверд.	Осухівська Г.М.										

роботи АЦП із використанням опорної напруги 3.3 В.

У фрагменті коду на рисунку 3.2 здійснюється оголошення змінних, які відповідають за прив'язку фізичних контактів мікроконтролера до відповідних функціональних елементів пристрою.

```
// Визначення цифрових пінів
const int encoderButtonPin = 2; // Кнопка енкодера
const int earpiecePin = 3; // Вихід звукового сигналу (використовується таймер 2)
const int T0InputPin = 4; // Подається імпульс з таймера 1 на таймер 0
const int coilDrivePin = 5; // Котушка передачі (PWM із таймера 0)
const int LcdPowerPin = 8; // Живлення дисплея
const int T0OutputPin = 9; // Зв'язок таймерів (TIMER1 → TIMER0)
// Аналогові входи
const int receiverInputPin = 0; //Сигнал від приймальної котушки
const int encoderAPin = A1; // Енкодер (сигнал А)
const int encoderBpin = A2; // Енкодер (сигнал В)
```

Рисунок 3.2 – Оголошення змінних системи

До цифрових пінів віднесено контакти, через які відбувається керування динаміком (вивід звукового сигналу), передача сигналу на передавальну котушку, організація зв'язку між таймерами, а також підключення кнопки енкодера та живлення для дисплея. Визначено також пін, на який надходить імпульсний сигнал від одного таймера до іншого з метою синхронізації генерації та аналізу сигналу. У блоці аналогових входів вказано контакт для прийому сигналу з приймальної котушки, що є основним джерелом інформації про зміну електромагнітного поля, а також два піни для зчитування сигналів від енкодера (канали А та В), які використовуються для зміни налаштувань системи. Усі призначення виконані з урахуванням апаратних можливостей мікроконтролера та подальшої оптимізації використання таймерів і портів введення/виведення.

На рисунку 3.3 зображено фрагмент коду, у якому реалізується початкова конфігурація апаратної частини системи, яка виконується при запуску мікроконтролера. Ініціалізується дисплей з роздільністю 16×2 символи для подальшого виведення інформації.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

```

void setup()
{
    lcd.begin(16, 2); // Ініціалізація LCD 16x2
    pinMode(encoderButtonPin, INPUT_PULLUP); // Кнопка енкодера з підтяжкою
    // Підготовка пінів для формування сигналу керування котушкою
    digitalWrite(T0OutputPin, LOW);
    pinMode(T0OutputPin, OUTPUT); // подача імпульсів з таймера 1 на таймер 0
    digitalWrite(coilDrivePin, LOW);
    pinMode(coilDrivePin, OUTPUT); // вихідний сигнал на передачу котушку
    cli(); // вимикаємо глобальні переривання на час конфігурації
    // Зупинка таймера 0 (перевизначаємо його налаштування від Arduino core)
    TCCR0B = 0; // Зупинка таймера
    TIMSK0 = 0; // вимикаємо переривання таймера 0
    TIFR0 = 0x07; // скидаємо всі прапорці переривань таймера 0
}

```

Рисунок 3.3 – Початкова конфігурація апаратної частини системи

Встановлюється режим роботи цифрового входу, до якого підключено кнопку енкодера, з активацією внутрішнього підтягувального резистора, що дозволяє уникнути коливань логічного рівня при розімкненні контакту. Далі виконується підготовка пінів для формування сигналу керування індуктивною котушкою, зокрема встановлення вихідного режиму роботи контактів та початкового рівня сигналу. Перед налаштуванням таймерів глобальні переривання вимикаються за допомогою команди `cli`, що гарантує коректність конфігурації апаратних регістрів. Після цього виконується повна деактивація таймера 0: зупиняється його робота, вимикаються пов'язані з ним переривання, а всі статусні прапорці скидаються для уникнення помилкового спрацювання. Цей блок створює необхідні умови для подальшої ручної конфігурації таймера відповідно до специфіки генерації сигналів у системі.

У фрагменті коду на рисунку. 3.4 реалізується налаштування підсистеми аналого-цифрового перетворення та конфігурація таймера 1 для генерації високочастотного сигналу. У першому блоці умовної компіляції визначається тип опорної напруги для АЦП: якщо активовано використання 3.3 В, то обирається зовнішнє джерело (AREF); інакше використовується внутрішня напруга AVcc. У обох випадках активується вирівнювання результату АЦП по лівому краю, що спрощує обробку даних при читанні лише старшого байта.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

```

#ifdef USE_3V3_AREF
    ADMUX = (1 << ADLAR); // Вибір AREF (3.3В) як опорної напруги
#else
    // Використання AVcc як опори
    ADMUX = (1 << REFS0) | (1 << ADLAR);
#endif

// Автотригер: запуск від переповнення TIMER1
ADCSRB = (1 << ADTS2) | (1 << ADTS1);
// Вмикаємо АЦП, автозапуск, дільник 16
ADCSRA = (1 << ADEN) | (1 << ADSC) | (1 << ADIF) | (1 << ADIFSC);
DIDR0 = 1; // Вимикаємо цифровий вхід на А0 для зменшення шуму
// Налаштування TIMER1 для генерації 62.5 кГц
// Фазово-коректний PWM, OC1A увімкнений
TCCR1A = (1 << COM1A1) | (1 << WGM11);
// CTC режим, без дільника
TCCR1B = (1 << WGM12) | (1 << WGM13) | (1 << CS10);
// ШІМ на половину циклу
OCR1AH = (TIMER1_TOP/2 >> 8); OCR1AL = (TIMER1_TOP/2 & 0xFF);
ICR1H = (TIMER1_TOP >> 8); ICR1L = (TIMER1_TOP & 0xFF); // TOP
TCNT1H = 0; TCNT1L = 0; // Обнулення лічильника
TIFR1 = 0x07; // Скидання прапорців
TIMSK1 = (1 << TOIE1); // Дозвіл переривання по переповненню TIMER1

```

Рисунок 3.4 – Налаштування підсистеми аналого-цифрового перетворення

Встановлюється режим автотригера, за якого запуск перетворення АЦП синхронізується з подією переповнення таймера 1, що дозволяє точно контролювати момент зчитування сигналу. Вмикається сам АЦП із дозволом автозапуску, стартом першого перетворення та встановленням дільника частоти, що формує тактову частоту для роботи модуля. Для зменшення рівня шуму на аналоговому вході А0 вимикається цифрова частина цього піну.

У наступному блоці відбувається конфігурація таймера 1 для формування сигналу із частотою 62,5 кГц у режимі фазово-коректного широтно-імпульсного модулювання (PWM). Встановлюється режим роботи, в якому вихід OC1A активується при відповідності лічильника значенню порівняння. У якості верхньої межі таймера (TOP) задається значення TIMER1_TOP, при цьому регістри OCR1A ініціалізуються на половину цієї величини, формуючи симетричний сигнал. Лічильник обнуляється для початку відліку з нуля, очищаються всі прапорці переривань, а також дозволяється переривання по переповненню таймера 1, що забезпечує точну

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

періодичність запуску процесів аналого-цифрового перетворення. Така конфігурація дозволяє отримати стабільний і синхронізований процес вимірювання амплітуди сигналу від індуктивного сенсора.

На рисунку 3.5 фрагменті коду реалізується конфігурація таймера 0, який використовується для керування передавальною котушкою. Таймер налаштовується в режимі швидкого широтно-імпульсного модулювання (Fast PWM), при якому сигнал виводиться на вихід OC0B (відповідний цифровому піну D5), що забезпечує генерацію височастотного збуджувального сигналу. В якості джерела тактування вказано зовнішній сигнал, який подається на пін T0, що дозволяє синхронізувати частоту генерації з сигналом від іншого таймера.

```
TCCR0A = (1 << COM0B1) | (1 << WGM01) | (1 << WGM00); // Fast PWM, вивід на OC0B (D5)
TCCR0B = (1 << CS00) | (1 << CS01) | (1 << CS02) | (1 << WGM02); // Джерело – T0
OCR0A = 7; OCR0B = 3; TCNT0 = 0;
sei(); // Увімкнення глобальних переривань
while (!sampleReady) {} // Очікуємо перше зчитування АЦП
misses = 0;
sampleReady = false;
Serial.begin(19200); // Серійний порт для діагностики
```

Рисунок 3.5 – Налаштування TIMER0 та увімкнення глобальних переривань

Регістри порівняння OCR0A та OCR0B встановлюють тривалість повного періоду та активної фази відповідно, а лічильник обнуляється для початку точного відліку. Після завершення налаштувань вмикаються глобальні переривання командою sei, що дозволяє системі реагувати на асинхронні події, зокрема переповнення таймера та завершення перетворення АЦП. Подальше виконання програми призупиняється в циклі очікування до моменту появи першого результату аналого-цифрового перетворення, що гарантує коректну роботу подальших обчислень. Після цього змінна, що відповідає за пропущені зчитування, обнуляється, а прапорець готовності скидається для подальшого оновлення. Завершується блок ініціалізацією серійного порту з фіксованою швидкістю передавання 19200 бод для

подальшого виведення діагностичної інформації або тестових даних у середовище моніторингу порту.

Рисунок 3.6 відображає фрагмент коду реалізує головний цикл роботи пристрою, який виконується безперервно після завершення ініціалізації. На початку кожної ітерації програма переходить у стан очікування, доки не буде отримано новий результат від аналогово-цифрового перетворювача. Це забезпечує синхронізацію обробки даних із моментом фактичного оновлення вхідного сигналу. Після отримання нового зразка фіксується поточне значення змінної `ticks`, яке відображає час або кількість тактів, що пройшли з моменту старту обробки.

```
void loop()
{
    while (!sampleReady) {} // Чекаємо, поки з'являться нові дані від АЦП
    uint32_t oldTicks = ticks; // Зберігаємо час початку обробки
    if (digitalRead(encoderButtonPin) == LOW)
    {
        // Якщо натиснута кнопка – запускається калібрування:
        // зберігаємо поточні значення фазових детекторів як «нульовий рівень» (фон)
        for (int i = 0; i < 4; ++i) {
            calib[i] = averages[i];
        }
        sampleReady = false;
        Serial.print("Calibrated: ");
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Calibrating... ");
        for (int i = 0; i < 4; ++i) {
            Serial.write(' ');
            Serial.print(calib[i]);
        }
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(' ');
        lcd.print(calib[4]); // Потенційна помилка: індекс 4 – поза межами [0..3]
        lcd.print(" ");
        Serial.println();
    }
}
```

Рисунок 3.6 – Фрагмент коду головного циклу роботи пристрою

У випадку, якщо натиснута кнопка енкодера, виконується процедура калібрування. Поточні значення з масиву середніх значень, що були отримані з фазових детекторів, копіюються до окремого масиву `calib`, який виконує роль

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нульового рівня або фонові величини. Це дозволяє пристрою адаптуватися до конкретного електромагнітного фону або умов середовища, і використовувати ці значення як базу для подальших порівнянь при виявленні металевих об'єктів. Після завершення копіювання скидається прапорець `sampleReady`, і на дисплей виводиться повідомлення про виконання калібрування. Паралельно відповідні значення надсилаються через серійний порт для діагностики.

У фрагменті коду на рисунку 3.7 реалізовано фазово-амплітудну обробку сигналу, який було попередньо зчитано та збережено в масиві середніх значень. На першому етапі виконується корекція цих значень шляхом віднімання раніше збережених калібрувальних величин, що відповідають фоновому електромагнітному середовищу.

```
// Коригування з урахуванням фонових значень (віднімання калібрування)
for (int i = 0; i < 4; ++i) {
    averages[i] -= calib[i];
}
const double f = 200.0;
// Фазова обробка для подавлення гармонік та нормалізації значень
double bin0 = (averages[0] + halfRoot2 * (averages[1] - averages[3])) / f;
double bin1 = (averages[1] + halfRoot2 * (averages[0] + averages[2])) / f;
double bin2 = (averages[2] + halfRoot2 * (averages[1] + averages[3])) / f;
double bin3 = (averages[3] + halfRoot2 * (averages[2] - averages[0])) / f;
sampleReady = false; // Дозволяємо ISR знову оновлювати averages[]
// Обчислення амплітуд за парами фаз (дві незалежні оцінки)
double amp1 = sqrt((bin0 * bin0) + (bin2 * bin2));
double amp2 = sqrt((bin1 * bin1) + (bin3 * bin3));
double ampAverage = (amp1 + amp2) / 2.0;
// Обчислення фаз (у градусах), враховуючи зсув вибірки АЦП
double phase1 = atan2(bin0, bin2) * radiansToDegrees + 45.0;
double phase2 = atan2(bin1, bin3) * radiansToDegrees;
// Упорядкування фаз
if (phase1 > phase2) {
    double temp = phase1;
    phase1 = phase2;
    phase2 = temp;
}
```

Рисунок 3.7 – Фазово-амплітудна обробка сигналу

Після цього розпочинається фазова обробка даних. Застосовується лінійна комбінація елементів з урахуванням коефіцієнта halfRoot2 , яка дозволяє приглушити гармоніки, компенсувати фазові викривлення та привести сигнали до нормалізованого вигляду. Кожна нова змінна $\text{bin0} \dots \text{bin3}$ є результатом перетворення відповідних комбінацій фазових компонент, поділених на сталий коефіцієнт f , що виконує роль масштабування.

Також відбувається обчислення амплітуд на основі пар фазових бінів: перша оцінка базується на bin0 та bin2 , друга – на bin1 та bin3 . Обидві величини поєднуються у середнє значення амплітуди, яке може бути використане для індикації або класифікації об'єкта. Окремо виконуються обчислення фазових зсувів із використанням функції atan2 , результат якої переводиться з радіанів у градуси, при цьому для першої фази додатково враховується фіксований зсув вибірки АЦП. Завершується блок впорядкуванням фаз: якщо перша фаза більша за другу, значення змінюються місцями для забезпечення коректної інтерпретації у подальшій логіці класифікації.

Фрагмент коду на рисунку 3.8 відповідає за формування звукової індикації виявлення металевого об'єкта та паралельний вивід інформації до серійного монітора.

```
float temp = ampAverage;
int thisPitch = map(temp, 10, 200, 100, 1500); // Частота тону в діапазоні 100-1500 Гц
tone(3, thisPitch, 120); // Вивід тону на пін 3 (навушники/зумер)
// Вивід сигналу у консоль ('!' x кількість перевищення порогу)
while (temp > threshold)
{
  Serial.write('!');
  temp -= (threshold / 2.0);
}
```

Рисунок 3.8 – Формування звукової індикації виявлення металевого об'єкта

На основі попередньо обчисленої середньої амплітуди сигналу створюється тимчасова змінна, яка використовується для модулювання частоти звукового сигналу. Застосовується функція map , яка лінійно

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

масштабує значення амплітуди з діапазону від 10 до 200 у відповідний діапазон частот від 100 до 1500 Гц. Це дозволяє отримати змінний звуковий тон: чим вища амплітуда – тим вищий тон, що на слух легко розпізнається користувачем.

Сигнал виводиться через функцію tone на пін 3, до якого підключено динамік або навушник, із фіксованою тривалістю звучання 120 мілісекунд. У такий спосіб реалізується простий аудіозв'язок між пристроєм і користувачем.

Після завершення етапів програмної реалізації та налагодження окремих функціональних блоків здійснено практичне збирання пристрою, що забезпечує фізичну інтеграцію всіх апаратних компонентів у єдиний функціональний модуль. Збирання виконано з урахуванням попередньо розробленої схеми, розташування елементів та вимог до зручності експлуатації. Особливу увагу приділено компактному компонуванню, надійності з'єднань і доступності функціональних елементів керування. На рисунку 3.9 наведено зовнішній вигляд зібраної конструкції комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів.



Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд блоку керування металошукача

Пристрій змонтовано в корпусі прямокутної форми, що забезпечує

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

механічний захист внутрішніх елементів та зручність обслуговування. Всередині розміщено мікроконтролер Arduino Nano, операційний підсилювач на макетній платі, модуль дисплея LCD1602, динамік, енкодер та елементи живлення. З'єднання між платами виконані гнучкими провідниками з фіксацією, що забезпечує стабільність під час роботи та дозволяє легко вносити зміни на етапі доопрацювання. Усі активні елементи розміщено з урахуванням теплових зазорів та мінімізації перешкод між аналоговими і цифровими трактами. Передбачено вивід дисплея та органів керування на зовнішню панель корпусу для забезпечення зручності користування у польових умовах.

На наступному етапі зібрану електронну частину інтегровано до конструкції повнорозмірного пристрою з ручкою, призначеною для зручного переміщення та позиціонування сенсорної частини в просторі. Зовнішній вигляд повністю змонтованого металошукача представлено на рисунку 3.10, де видно завершену конструкцію пристрою в робочому положенні.

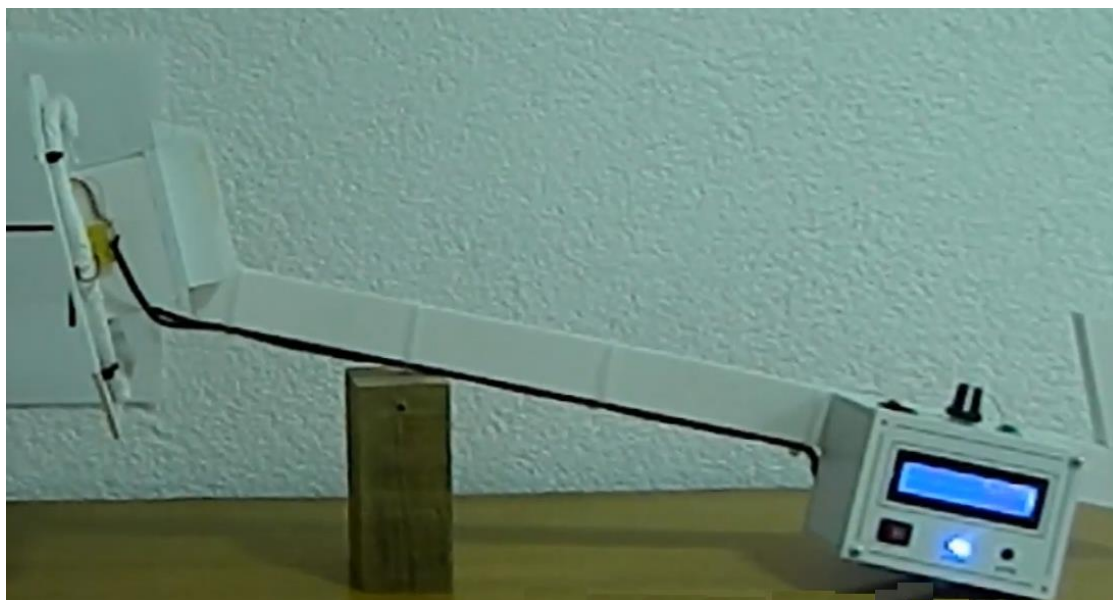


Рисунок 3.10 – Загальний вигляд повністю зібраного металошукача у корпусі з сенсорною частиною

Основні елементи пристрою, включно з дисплеєм, енкодером та

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

вимикачем живлення, змонтовано у фронтальній панелі корпусу, що забезпечує зручний доступ до елементів керування під час експлуатації. Корпус виготовлено з жорсткого легкого матеріалу, який водночас забезпечує механічну міцність і мінімальний вплив на електромагнітне поле, що особливо важливо для стабільної роботи індуктивного сенсора. Плече пристрою виконане у вигляді складаної або телескопічної конструкції, що дозволяє регулювати довжину для зручності користувача. На протилежному боці розташовано передавальну та приймальну котушки, закріплені на тримачі з фіксацією, що забезпечує стабільність їхнього положення відносно поверхні. Кабель між сенсорною частиною та основним блоком виведено всередині опори, що забезпечує захист з'єднання від зовнішніх впливів.

Загалом конструкція поєднує ергономічність, стабільність кріплень та доступ до інтерфейсу взаємодії з користувачем, що дозволяє ефективно використовувати пристрій як у приміщеннях, так і в польових умовах.

3.2 Тестування

Після завершення етапу розробки, збирання та налагодження пристрою було здійснено тестування його працездатності в умовах, наближених до реальних. На цьому етапі перевірялась коректність функціонування апаратних вузлів, алгоритмів обробки сигналу, системи індикації, а також стабільність та чутливість до металевих об'єктів різного типу. Підготовка до експериментів передбачала перевірку елементів живлення, виконання калібрування пристрою на тлі чистої поверхні без металевих домішок, а також створення контрольованого середовища для розміщення тестових об'єктів. Для фіксації результатів використовувався дисплей, на якому виводилась інформація про силу сигналу, наявність об'єкта та його ймовірну класифікацію.

На рисунку 3.11 представлено фрагмент експериментального тестування системи в умовах контрольованого виявлення металевих об'єктів на гладкій горизонтальній поверхні.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

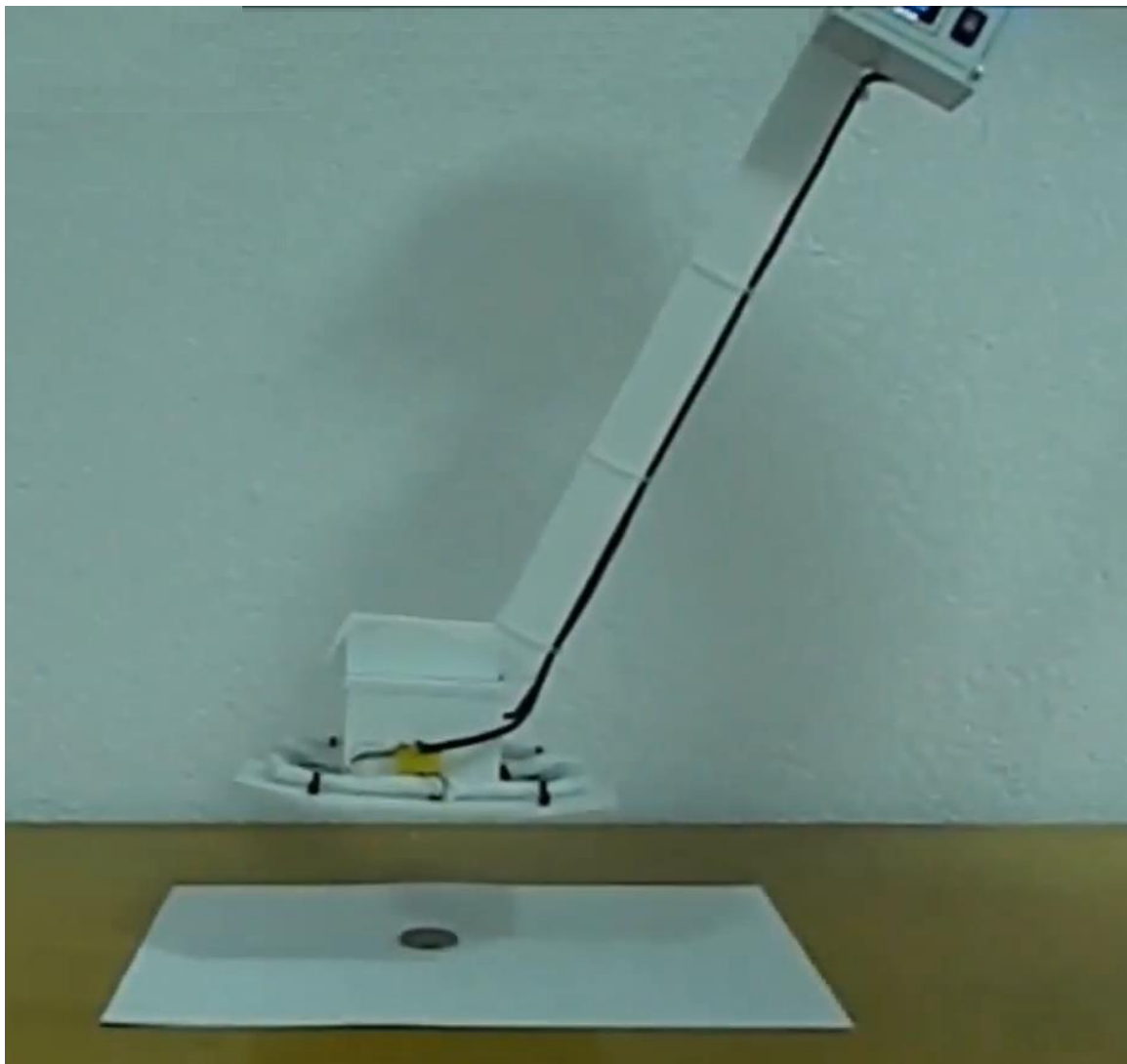


Рисунок 3.11 – Випробування пристрою над металевим об’єктом

На зображенні видно, що пристрій розташований над площиною з розміщеним тестовим зразком, у ролі якого використано металеву монету. Сенсорна частина встановлена на фіксованій висоті для забезпечення повторюваності експерименту. В процесі наближення котушки до об’єкта система генерує відповідний відгук у вигляді звукового сигналу та змін на екрані дисплея. Така конфігурація дозволяє перевірити ефективність виявлення об’єкта, мінімальну відстань реакції, а також здатність пристрою до ідентифікації металів на основі аналізу амплітудно-фазових характеристик сигналу.

Для кількісної оцінки працездатності системи було проведено серію експериментів з різними металевими зразками, під час яких фіксувались

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

значення амплітуди сигналу та усередненої фази при змінній відстані між сенсорною частиною пристрою та об'єктом. Зібрані результати дали змогу проаналізувати реакцію пристрою на залізовмісні матеріали, зокрема визначити характер змін вимірюваних параметрів залежно від просторового положення об'єкта. Для узагальнення результатів експерименту в таблиці 3.1 наведено вибірку значень для зразків з заліза та чавуну.

Таблиця 3.1 – Експериментальні дані для заліза

Матеріал	Відстань до об'єкта, см	Амплітуда сигналу	Середня фаза, град.
Залізо	2	151.79	6.68
Залізо	2	155.42	8.16
Залізо	4	143.11	2.19
Залізо	4	152.58	6.54
Залізо	6	152.58	10.00
Чавун	6	156.94	3.12
Чавун	8	147.91	1.74
Чавун	8	141.39	4.23
Чавун	10	147.46	6.08
Чавун	10	139.77	5.01

Згідно з наведеними даними, амплітудні значення для зразків із заліза залишаються достатньо стабільними у межах діапазону від 2 до 6 см, що свідчить про чутливість пристрою до феромагнітних об'єктів навіть на помірних відстанях. Водночас фазовий зсув демонструє варіативність, що, ймовірно, зумовлено локальними неоднорідностями у внутрішній структурі матеріалу або впливом геометрії зразка. Для зразків чавуну спостерігається дещо інший характер змін: хоча амплітуда сигналу також зберігається в межах допустимих значень навіть на 10 см, фазові значення є менш вираженими та більш рівномірно розподіленими. Це може свідчити про інший тип взаємодії сигналу з матеріалом, що потенційно дозволяє відрізняти тип об'єкта не лише за амплітудою, а й за фазовою характеристикою. Загалом, результати

демонструють стабільну роботу пристрою з достатньою роздільною здатністю як за відстанню, так і за електрофізичними властивостями виявлених тіл.

Продовження експериментальної частини передбачало дослідження реакції системи на кольорові метали, які мають принципово інші електромагнітні властивості порівняно з феромагнітними матеріалами. Основна мета полягала у виявленні характерних змін амплітудно-фазових параметрів сигналу при різних відстанях до об'єкта, що дозволяє оцінити здатність пристрою не лише виявляти, а й диференціювати типи металів. У таблиці 3.2 наведено результати тестувань із міддю та алюмінієм, що належать до групи кольорових металів.

Таблиця 3.2 – Експериментальні дані для кольорових металів

Матеріал	Відстань до об'єкта, см	Амплітуда сигналу	Середня фаза, град.
Мідь	2	88.76	-31.15
Мідь	2	87.58	-33.82
Мідь	4	86.48	-28.34
Мідь	4	89.22	-27.43
Мідь	10	84.63	-25.91
Алюміній	6	92.34	-19.48
Алюміній	6	95.18	-21.01
Алюміній	8	91.47	-22.74
Алюміній	8	88.95	-20.38
Алюміній	10	90.12	-18.77

Згідно з отриманими даними, сигнал від мідних зразків характеризується стабільно нижчими амплітудними значеннями порівняно з феромагнітними металами, що свідчить про слабше індукування зворотного електромагнітного поля в матеріалі. Більш показовою є фазова складова: значення фази для міді мають від'ємні значення з помітним зсувом у діапазоні $-25...-34$ градусів, що чітко відрізняє ці сигнали від фазових характеристик заліза чи чавуну. Така особливість фазової відповіді дозволяє надійно класифікувати мідь навіть при

зменшенні амплітуди.

Для алюмінію спостерігається дещо вища амплітуда сигналу, яка зберігається в межах 88–95 одиниць, незалежно від відстані до об'єкта в межах 6–10 см. Водночас фаза сигналу також стабільно від'ємна, але має меншу абсолютну величину порівняно з міддю – переважно в діапазоні –18...–22 градусів. Такий розподіл значень свідчить про відмінну реакцію пристрою на кольорові метали з виразним фазовим підписом, що дає змогу використовувати фазову характеристику як основний критерій розпізнавання типу виявленого об'єкта. Виявлена різниця фаз між залізовмісними та кольоровими металами створює умови для ефективної реалізації фазової дискримінації у складі програмного забезпечення пристрою.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Долікарська допомога при вивихах

Вивих – це стійке зміщення суглобових кінців кісток відносно одна одної, що супроводжується порушенням анатомічної цілісності суглоба, пошкодженням капсули суглоба, зв'язок, м'язів, а іноді й судин чи нервів. Це досить серйозна травма, яка потребує якнайшвидшого медичного втручання. Водночас важливу роль відіграє правильне надання долікарської допомоги, яка може суттєво вплинути на подальший стан потерпілого та ефективність лікування.

Вивихи можуть виникати внаслідок падіння, удару або різкого насильницького руху в суглобі, який перевищує його фізіологічні межі. Найчастіше травмуються плечовий, ліктьовий, пальцеві, тазостегновий та гомілковостопний суглоби.

Основні ознаки вивиху:

- різкий біль у ділянці суглоба, який посилюється при найменшій спробі руху;
- деформація суглоба, порушення його звичної форми;
- неможливість активних рухів у суглобі;
- набряк і почервоніння шкіри над ураженою ділянкою;
- вимушене положення кінцівки;
- вкорочення або видовження кінцівки (залежно від типу вивиху).
- порушення чутливості або рухливості нижче травми через ураження нервів.

Неправильна допомога може призвести до ускладнень, таких як пошкодження нервово-судинного пучка, утворення хибного суглоба, хронічна

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.					Безпека життєдіяльності, основи охорони праці		
Перевірів							
Консульт.	Гурик О.Я.						
Н. Контр.							
Затверд.	Осухівська Г.М.						
					Літ.	Арк.	Аркуші
						57	68
					ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		

нестабільність суглоба. Тому надання першої допомоги має ґрунтуватися на наступних принципах:

- забезпечення спокою ушкодженій кінцівці. Потерпілому слід забезпечити зручне положення, обмеживши будь-які рухи у травмованій ділянці. Це запобігає додатковому ушкодженню тканин;

- іммобілізація. Травмовану кінцівку необхідно зафіксувати в тому положенні, в якому вона перебуває після травми – не намагаючись вправити вивих. Для фіксації використовують підручні засоби: дошки, фанеру, картон, рулон газети або спеціальні шини. Плечовий суглоб фіксують косинкою або бинтом, що підтримує руку; для тазостегнового суглоба можна застосовувати іммобілізацію до тулуба;

- прикладання холоду. До місця вивиху бажано прикласти холод (лід, пляшку з холодною водою, сніг, змочену в холодній воді тканину), що сприяє зменшенню болю, набряку і запобігає розвитку гематоми. Холод прикладають на 15–20 хвилин з перервами;

- забезпечення фізіологічного положення. Якщо кінцівка у незвичному положенні, її не можна силоміць повертати до нормального – це може поглибити травму;

- контроль загального стану потерпілого. Особливо це важливо при травмах великих суглобів, супроводжених значним больовим синдромом. У разі потреби – забезпечити потерпілому положення лежачи, контролювати дихання та пульс;

- забезпечення транспортування до лікувального закладу. Потерпілого якомога швидше слід доставити до медичного закладу для кваліфікованого лікування. Вивихи вправляє тільки лікар-травматолог після проведення відповідної діагностики (наприклад, рентгенографії).

Правильне надання долікарської допомоги при вивихах є критично важливим фактором для зменшення болю, профілактики ускладнень і створення умов для подальшого ефективного лікування.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Заходи покращення умов оператора

У сучасних умовах інтенсифікації виробничих процесів діяльність оператора – це складна праця, що передбачає високий рівень відповідальності, зосередженості, точності та швидкого прийняття рішень. Водночас монотонність, емоційне навантаження, статичне положення тіла, недостатнє освітлення, шум, мікроклімат та інші чинники можуть негативно впливати на стан здоров'я оператора, знижувати його працездатність і сприяти виникненню професійних захворювань та помилок у керуванні технологічними процесами. Тому заходи з покращення умов праці оператора є невід'ємною складовою системи охорони праці.

Першочерговим завданням є створення ергономічно обґрунтованого робочого місця. Це передбачає:

- раціональне розміщення органів керування та індикації відповідно до зон досяжності та поля зору оператора;
- регульоване робоче крісло з підтримкою спини та можливістю налаштування висоти, нахилу й глибини сидіння;
- оптимальна висота стільниці й правильне розміщення клавіатури, моніторів або інших пристроїв для зменшення статичного навантаження;
- підставка для ніг, якщо висота сидіння не дозволяє ногам торкатись підлоги;
- ергономічне проектування сприяє зниженню фізіологічного стомлення, зменшенню ризику розвитку остеохондрозу, варикозу та інших захворювань опорно-рухового апарату.

Мікрокліматичні умови відіграють важливу роль у підтриманні нормальної фізіологічної активності. Згідно з вимогами ДСН 3.3.6.042-99, у приміщеннях для операторів мають бути дотримані такі параметри:

- температура повітря у межах 20–24 °С;
- відносна вологість повітря 40–60 %;
- швидкість руху повітря не більше 0,2 м/с;

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- відсутність локальних переохолоджень або перегрівів.

Для цього необхідно використовувати системи вентиляції, кондиціонування або зволоження повітря залежно від сезону та типу приміщення. Порушення мікроклімату може призвести до швидкої втоми, зниження уваги та загального самопочуття.

Якісне освітлення запобігає перенапруженню зору, головному болю та зниженню точності роботи. Важливо:

- забезпечити природне освітлення (при наявності вікон), орієнтуючи робоче місце так, щоб уникати засліплення;
- застосовувати локальне освітлення з регульованою яскравістю та без стробоскопічного ефекту;
- забезпечити загальне освітлення згідно з нормами (не менше 300 лк для операторських постів);
- використовувати джерела світла з температурою кольору 4000–5000 К, які максимально наближені до денного світла.

Тривала дія шуму понад 60 дБ негативно впливає на нервову систему, порушує концентрацію, погіршує слух. Вібрації також є несприятливим фактором, особливо при тривалій дії на руки чи усе тіло. Задля мінімізації впливу необхідно:

- встановлювати звукоізоляційні матеріали на стінах, стелі та в обладнанні;
- використовувати антивібраційні опори або прокладки;
- застосовувати засоби індивідуального захисту органів слуху, якщо інші заходи недостатні;
- забезпечити регулярний технічний контроль шуму та вібрацій.

Найбільш ефективною формою профілактики втоми є раціональний режим роботи:

- тривалість безперервної роботи не повинна перевищувати 1–1,5 години, після чого необхідна коротка перерва 5–10 хвилин;
- під час зміни необхідно організовувати санітарно-побутові перерви;

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– рекомендовано виконувати вправи для очей, рук та хребта під час перерв;

– бажано чергувати розумову та фізичну активність.

Ці заходи дозволяють зменшити розумову втому, знизити ризик монотонності та помилок.

Операторська діяльність нерідко супроводжується емоційною напругою, необхідністю швидко реагувати на аварійні ситуації або нестандартні умови.

Для зменшення стресових чинників доцільно:

– проводити психологічний добір персоналу відповідно до професійної придатності;

– впроваджувати тренінги зі стресостійкості;

– забезпечувати стабільний робочий графік, уникати понаднормової роботи;

– створити позитивний мікроклімат у колективі, підтримку з боку керівництва.

До заходів покращення умов праці також належить:

– оснащення техніки захисними засобами (екрани, кожухи);

– наявність систем аварійного вимкнення;

– контроль справності обладнання, особливо органів управління;

– інструктажі з охорони праці, навчання діям у нештатних ситуаціях;

– наявність аптечки та вогнегасника в операторських приміщеннях.

Заходи покращення умов праці оператора є комплексом технічних, санітарно-гігієнічних, ергономічних і психофізіологічних рішень, спрямованих на зниження шкідливих впливів виробничого середовища, підвищення безпеки, продуктивності праці та збереження здоров'я працівника. Впровадження таких заходів є обов'язковою умовою для підприємств, які прагнуть відповідати вимогам сучасної охорони.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто наступних результатів:

1. Розроблено структурну та функціональну архітектуру комп'ютеризованої системи пошуку металевих предметів, яка базується на мікроконтролері Arduino Nano, сенсорній індуктивній частині, аналоговому підсилювальному каскаді та системі індикації на основі LCD-дисплея.

2. Обґрунтовано вибір апаратного забезпечення системи: мікроконтролера Arduino Nano як обчислювального ядра, операційного підсилювача TL081 для попереднього підсилення сигналу, символьного дисплея LCD1602 для виведення результатів та транзистора BC547 для комутації виконавчих елементів. Проведено порівняльний аналіз альтернативних рішень (MSP430G2231, Raspberry Pi) та індикаторних пристроїв (OLED, TFT).

3. Вибрано та реалізовано програмне середовище розробки Arduino IDE, як найбільш сумісне з апаратною платформою, просте у використанні та підтримуване широким набором бібліотек і прикладів.

4. Реалізовано програмну логіку пристрою у вигляді повнофункціонального коду, який виконує ініціалізацію апаратних модулів, керування таймерами, обробку аналогових сигналів, розрахунок амплітуди та фази, генерацію звукової сигналізації та виведення результатів на дисплей.

5. Здійснено збирання пристрою, створено компактний корпус із ергономічним розташуванням інтерфейсних елементів, забезпечено електромагнітну розв'язку аналогових і цифрових частин схеми та закріплено сенсорну частину в мобільній конструкції.

6. Проведено експериментальне тестування системи в контрольованих умовах з використанням зразків з феромагнітних та кольорових металів. Встановлено стійкий амплітудно-фазовий відгук системи на об'єкти на відстані до 10 см.

					<i>КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Виконано аналіз отриманих експериментальних даних, який засвідчив здатність пристрою не лише виявляти наявність металу, а й диференціювати його тип на основі фазового зсуву, що закладає основу для подальшого вдосконалення системи у напрямі автоматичної класифікації.

8. Підтверджено працездатність розробленої системи, її стабільність в умовах реального використання, а також потенційну придатність для побутового та навчального застосування з можливістю подальшої модернізації.

					<i>КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Arduino Nano - Pinout, Specifications, Pin Configuration. URL: <https://techzeero.com/iot-devices/arduino/arduino-nano/> (дата звернення 19.06.2025).

2. BC547 NPN Transistor - Pack of 50. URL: <https://www.ebay.com/itm/274398006854> (дата звернення 19.06.2025).

3. GC-1069 Smarthunter digital metall detector. URL: <https://www.airgoo.com/products/gc-1069-smarthunter-digital-metalldetector-for-children> (дата звернення 19.06.2025).

4. Kingdetector MD-4030 Pro Edition Hobby Explorer Waterproof Search Coil with shovel Metal. URL: (дата звернення 19.06.2025).

5. KY-006 PASSIVE BUZZER MODULE - RoboticX. URL: <https://roboticx.ps/product/ky-006-passive-buzzer-module/> (дата звернення 19.06.2025).

6. LCD1602 RGB Module, 16x2 Characters LCD, RGB Backlight, 3.3V/5V, I2C Bus. URL: <https://www.botnroll.com/en/alphanumeric/4509-lcd1602-rgb-module-16x2-characters-lcd-rgb-backlight-3-3v-5v-i2c-bus.html> (дата звернення 19.06.2025).

7. MD4030 Metal Detector Md 4030 Professional Metal Detectors Gold Detectors Treasure Hunter Tracker Seeker, Flexible Operation. URL: <https://www.amazon.com/Detector-Professional-Detectors-Treasure-Operation/dp/B0DWS9WJSG> (дата звернення 19.06.2025).

8. MD-4030 Professional Underground Metal Detector. URL: <https://joanallen.co.uk/product/md-4030-professional-underground-metal-detector/> (дата звернення 19.06.2025).

9. Minelab GO-FIND 22 Metal Detector. URL: https://kellycodetectors.com/minelab-go-find-22-metal-detector/?srsltid=AfmBOooyUES_S2LAyIRqEfzproPq7YrdyX46x0mFBMAiZHFhxZcFKPko (дата звернення 19.06.2025).

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

10. Minelab Go-Find 22 Metal Detector. URL: https://www.bcf.com.au/p/minelab-go-find-22-metal-detector/554738.html?srsltid=AfmBOooYRA9T8MRxy_LmR_WR3gqX_dIMDjg8cwXqwZopD6G6PzSM_lXD (дата звернення 19.06.2025).

11. Minelab Go-Find 22, 44 and 66 Review. URL: <https://detecthistory.com/reviews/minelab-go-find-metal-detectors-review/> (дата звернення 19.06.2025).

12. MSP430G2231 | Embedded Lab. URL: <https://embedded-lab.com/blog/tag/msp430g2231/> (дата звернення 19.06.2025).

13. Najeh, H., Lohr, C., & Leduc, B. Real-Time Human Activity Recognition on Embedded Equipment: A Comparative Study. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No 6, 377 p.

14. Palamar A., Karpinski M., Palamar M., Osukhivska H., Mytnyk M. Remote Air Pollution Monitoring System Based on Internet of Things. CEUR Workshop Proceedings, 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2022), Ternopil, Ukraine, November 22–24, 2022. Vol. 3309. P. 194-204.

15. Raspberry Pi 4 Model B review: A capable, flexible and affordable DIY computing platform | ZDNET. URL: <https://www.zdnet.com/product/raspberry-pi-4-model-b/> (дата звернення 19.06.2025).

16. Shukla, A., & Diwan, R. IoT based load automation with remote access surveillance using ESP 32 Cam and ESP 8266 module. Annals of the Romanian Society for Cell Biology. 2021. Vol. 25, No 3, pp. 904-914.

17. TL081 Single Op-Amp Basics: Pinout Diagram, Application Ideas, and Datasheet Review. URL: <https://www.ariat-tech.com/blog/TL081-single-Op-Amp-basics-pinout-diagram-application-ideas-and-datasheet-review.html> (дата звернення 19.06.2025).

18. URCERI GC-1069 Metal Detector - Black. URL: <https://www.ebay.com/p/15032714225> (дата звернення 19.06.2025).

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

19. GC-1069 Smarthunter digital metaldetector for children. URL: <https://www.fengda-europe.com/Webwinkel-Product-202772863/GC-1069-Smarthunter-digitale-metaaldetector-voor-kinderen.html?Lng=en> (дата звернення 19.06.2025).

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

21. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.

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

23. Погребенник В. Д., Клим Г. І., Бордун І. М., Пташник В. В., Паламар А. М. Системи оперативного контролю інтегральних параметрів водного середовища. Т. 2. Елементи комп'ютерних систем оперативного контролю: колективна монографія. Житомир: Видавничий дім «Бук-Друк», 2021. 180 с.

24. Романов Д.В., Осухівська Г.М., Паламар А.М. Система управління зовнішнім освітленням на основі Інтернету речей. Актуальні задачі сучасних технологій : збірник тез доповідей X міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів (Тернопіль, 24-25 листопада 2021 року), Тернопіль: ТНТУ, 2021. С. 120.

25. Свергун С., Жаровський Р. Тестування програмного забезпечення побудованого на мікросервісній архітектурі. Матеріали X науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі системи та технології» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 92.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26. Лупенко С.А., Пасічник В.В., Тиш Є.В. Комп'ютерна логіка. Навчальний посібник. Львів: Видавництво «Магнолія 2006», 2024. 354 с.

27. Тиш Є.В. Узагальнений алгоритм синтезу компонентів комп'ютерних систем на основі мікропрограмних автоматів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Том 36 (75), № 1, 2025. С. 247-253.

28. Tysh Ie. Approach and method of evaluation of the general reliability indicator of computer systems. International scientific journal "Computer systems and information technologies", 3 (5). Khmelnytskyi National University. 2021. P.74-80.

29. Тиш Є.В., Шалапай Р.І. Типи вимог до комп'ютерних систем і методи їх виявлення. Матеріали XII міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (6-7 грудня 2023 року). Тернопіль: ТНТУ. 2023. С. 437.

					КС КРБ 123.202.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Додаток А

Технічне завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

“Затверджую”

Завідувач кафедри КС

_____ Осухівська Г.М.

“___” _____ 2025 р

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ПОШУКУ МЕТАЛЕВИХ ПРЕДМЕТІВ

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на 8 листках

Вид робіт:

Кваліфікаційна робота

На здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

«УЗГОДЖЕНО»

«ВИКОНАВЕЦЬ»

Керівник кваліфікаційної роботи

Студент групи СІ-41

_____ к.т.н., доц. Тиш Є.В.

_____ Данилишин А.І.

«___» _____ 2025 р.

«___» _____ 2025 р.

Тернопіль 2025

1 Загальні відомості

1.1 Повна назва та її умовне позначення

Повна назва теми кваліфікаційної роботи: «Комп'ютеризована система пошуку металевих предметів».

Умовне позначення кваліфікаційної роботи: КС КРБ 123.202.00.00

1.2 Виконавець

Студент групи СІ-41, факультету комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Данилишин А.І.

1.3 Підстава для виконання роботи

Підставою для виконання кваліфікаційної роботи є наказ по університету (№4/7-53 від 27.01.2025 р.)

1.4 Планові терміни початку та завершення роботи

Плановий термін початку виконання кваліфікаційної роботи – 27.01.2025 р.

Плановий термін завершення виконання кваліфікаційної роботи – 23.06.2025 р.

1.5 Порядок оформлення та пред'явлення результатів роботи

Порядок оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу здійснюється у відповідності до чинних норм та правил ISO, ЕСКД, ЕСПД та ДСТУ.

Пред'явлення проміжних результатів роботи з виконання кваліфікаційної роботи здійснюється у відповідності до графіку, затвердженого керівником роботи. Попередній захист кваліфікаційної роботи відбувається при готовності роботи – наявності пояснювальної записки та графічного матеріалу.

Пред'явлення результатів кваліфікаційної роботи відбувається шляхом захисту на відповідному засіданні ЕК, ілюстрацією основних досягнень за допомогою графічного матеріалу.

2 Призначення і цілі створення системи

2.1 Призначення системи

Розроблювана система призначена для:

- виявлення металевих предметів у ґрунті або під поверхнею шляхом аналізу змін електромагнітного поля;
- індикації наявності об'єкта за допомогою візуальних та звукових засобів.

2.2 Мета створення системи

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та налаштування пристрою пошуку металевих предметів на основі мікроконтролера Arduino Nano з реалізацією фазово-амплітудної обробки сигналів.

2.3 Характеристика об'єкту

Систему призначено для застосування в аматорських, навчальних і побутових умовах для пошуку феромагнітних та кольорових металів на малій глибині.

3 Вимоги до системи

3.1 Вимоги до системи в цілому

3.1.1 Вимоги до структури та функціонування системи

Комп'ютеризована система пошуку металевих предметів повинна включати такі основні компоненти:

- сенсорний модуль з передавальною та приймальною котушками;
- блок аналогової обробки сигналу на основі операційного підсилювача;
- мікроконтролер для цифрової обробки, аналізу та індикації результатів;
- інтерфейс користувача з дисплеєм та звуковим оповіщенням.

3.1.2 Вимоги до способів та засобів зв'язку між компонентами системи

Компоненти системи мають бути електрично сумісними, з'єднаними згідно зі схемою, що забезпечує надійний обмін аналоговими та цифровими сигналами. Обмін між модулями має здійснюватися із мінімальними перешкодами та затримками.

3.1.3 Вимоги до режимів функціонування системи

Система повинна функціонувати у стандартному режимі з постійним моніторингом електромагнітного фону та обробкою сигналів у реальному часі. У разі збоїв або нестабільного живлення система повинна переходити в базовий режим, в якому підтримується виведення мінімальної інформації та відключення несуттєвих функцій.

3.1.4 Вимоги по діагностуванню системи

Передбачено виведення службової інформації через вбудований серійний інтерфейс для перевірки стану основних модулів (модуль АЦП, таймери, фазовий аналіз). Діагностика також можлива шляхом аналізу амплітудних і фазових значень у контрольних точках на дисплеї або в моніторі порту.

3.1.5 Перспективи розвитку, проектування системи

Система має потенціал для подальшого вдосконалення шляхом інтеграції бездротового зв'язку (наприклад, Bluetooth або Wi-Fi), додавання модуля пам'яті для збереження результатів, розширення функцій класифікації за допомогою машинного навчання та реалізації графічного інтерфейсу на дисплеях з вищою роздільністю.

3.2 Показники призначення

Система повинна бути придатною для експлуатації в умовах, що допускають подальше вдосконалення програмної логіки, зміни конструкції сенсорного блоку або модернізацію інтерфейсу користувача. Передбачається можливість масштабування функціоналу шляхом заміни або доповнення апаратних компонентів, а також внесення змін у програмне забезпечення без потреби повної реконфігурації пристрою.

3.2.1 Вимоги до надійності

Система повинна зберігати працездатність або забезпечувати її відновлення у випадку:

- короткотривалих порушень у електроживленні;
- нестабільної роботи окремих апаратних модулів (дисплея, енкодера, динаміка тощо);

– програмних збоїв, пов’язаних з помилками в логіці взаємодії модулів або перериваннях.

Для мінімізації впливу зовнішніх електромагнітних завад допускається застосування екранування аналогової частини пристрою та встановлення базових фільтрувальних елементів у колі живлення. Уся схема має бути зібрана відповідно до вимог електричної стійкості та відновлюваності, з урахуванням типових сценаріїв польового використання.

3.3 Вимоги до безпеки

Елементи системи, що працюють під напругою, повинні бути надійно ізольовані або поміщені в корпус, який унеможливило випадковий дотик під час експлуатації. Усі електричні з’єднання мають бути виконані з урахуванням полярності, допустимих рівнів струму та захисту від короткого замикання. При використанні зовнішніх джерел живлення передбачено інтеграцію захисного вимикача або запобіжника, що забезпечує відключення живлення у разі перевантаження чи аварійного режиму. Матеріали, використані для корпусу, повинні відповідати вимогам пожежної безпеки, не підтримувати горіння та не виділяти токсичних продуктів при нагріванні. Система повинна допускати ручне аварійне вимикання живлення без пошкодження основних модулів.

3.3.1 Вимоги до експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і зберігання компонентів системи

Умови експлуатації пристрою мають відповідати вимогам до мікроклімату згідно з ДСН 3.3.6.042-99: допустимий температурний діапазон становить від +10 °C до +35 °C, відносна вологість повітря – від 30% до 80% при температурі 25 °C, атмосферний тиск – у межах 760 ± 25 мм рт. ст. Зберігання пристрою має відбуватись у сухому приміщенні без впливу прямих

джерел тепла, пилу та вібрацій. Технічне обслуговування включає перевірку з'єднань, цілісності котушки, працездатності дисплея, елементів живлення та контактів, а також профілактичне очищення внутрішніх елементів від забруднень. Рекомендується проводити тестування чутливості та калібрування не рідше одного разу на рік, з використанням еталонних зразків. У разі виявлення нестабільної роботи необхідно виконати аналіз причин, провести діагностику основних вузлів та за потреби замінити пошкоджені елементи згідно з технічною документацією.

3.4 Вимоги до захисту інформації від несанкціонованого доступу

Оскільки комп'ютеризована система пошуку металевих предметів не передбачає обробки або зберігання конфіденційної інформації, вимоги до захисту даних є мінімальними. Уся обробка даних здійснюється локально на рівні мікроконтролера, без підключення до мереж або зовнішніх обчислювальних систем, що істотно знижує ризики несанкціонованого доступу. У разі розширення функціоналу, зокрема при додаванні засобів бездротового передавання даних або підключення до зовнішніх пристроїв зберігання, можуть бути застосовані базові методи захисту – зокрема, апаратне блокування доступу, ізоляція шин обміну, перевірка авторизованості команд на рівні прошивки.

У майбутньому, для розширених версій пристрою, допускається реалізація елементарної автентифікації, обмеження прав доступу до конфігураційних режимів або інтеграція апаратних засобів захисту відповідно до рівня загроз. У такому випадку захист має відповідати загальним вимогам до побутових вбудованих систем, що не обробляють класифіковані або персоналізовані дані.

3.4.1 Вимоги по збереженню інформації при аваріях

Оскільки пристрій функціонує автономно без постійного підключення до зовнішніх накопичувачів, інформація зберігається лише протягом активної сесії вимірювання. У разі аварійного відключення живлення або програмного збою передбачено обнулення буфера вимірювань. За потреби розширення функціоналу системи може бути реалізовано збереження критичних даних (наприклад, калібрувальних параметрів) у енергонезалежній пам'яті мікроконтролера або на зовнішньому носії (SD-карті).

3.4.2 Вимоги по стандартизації і уніфікації

Конструктивне виконання пристрою має відповідати базовим вимогам стандартизації для електронних побутових приладів. Усі компоненти (мікроконтролер, дисплей, датчики, живлення) повинні бути сумісні за рівнями напруги, інтерфейсами передавання даних та мати сертифікати відповідності згідно з чинними технічними регламентами. Корпус пристрою має бути ергономічним, зручним для тримання під час експлуатації на відкритій місцевості.

3.4.3 Вимоги до функцій (завдань), що виконуються системою:

Система повинна забезпечувати інтуїтивно зрозумілу взаємодію з користувачем через кнопку-енкодер і рідкокристалічний дисплей. Основні функції включають калібрування фону, обчислення фазових характеристик сигналу, візуалізацію амплітуди та фази, а також подання акустичного сигналу при виявленні металевого об'єкта. Пристрій має реагувати на зміни в оточенні в режимі реального часу, демонструючи належну швидкодію та стабільність вимірювань.

4 Вимоги до документації

Документація повинна відповідати вимогам ЄСКД та ДСТУ

Комплект документації повинен складатись з:

- пояснювальної записки;
- графічного матеріалу:
 - а) Структурна схема.
 - б) Блок схема роботи комп'ютеризованої системи.
 - в) Схема електрична принципова.
 - г) Схема електрична монтажна (з'єднань).

*Примітка: У комплект документації можуть вноситися зміни та доповнення в процесі розробки.

5 Стадії та етапи проектування

Таблиця 1 – Стадії та етапи виконання кваліфікаційної роботи бакалавра

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання
1	Розробка технічного завдання.	27.01.2025р. – 02.02.2025р.
2	Аналіз вимог та оцінка рішень	01.04.2025р. – 15.04.2025р.
3	Проектування структури й вибір компонентів	15.04.2025р. – 30.04.2025р.
4	Реалізація пристрою та його тестування	01.05.2025р. – 15.05.2025р.
5	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	15.05.2025р. – 30.05.2025р.
6	Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	01.06.2025р. – 08.06.2025р.
7	Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами	9.06.2025р. – 15.06.2025р.
8	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	16.06.2025р. – 22.06.2025р.
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	25.06.2025р.

6 Додаткові умови виконання кваліфікаційної роботи

Під час виконання кваліфікаційної роботи у дане технічне завдання можуть вноситися зміни та доповнення.

Додаток Б

Код керування контролером

```
#include <LiquidCrystal.h>          // Підключення бібліотеки для роботи з LCD 16x2
#include <LcdBarGraph.h>            // Бібліотека для відображення графіка на LCD
#define max_ampAverage 200         // Максимальне значення амплітуди, що
// відображається на шкалі
// Ініціалізація LCD-екрана (використовуються пін RS=6, E=7, D4-D7=10-13)
LiquidCrystal lcd(6, 7, 10, 11, 12, 13);
LcdBarGraph lbg(&lcd, 16, 0, 1); // Вивід графіка на нижній рядок дисплея
#define TIMER1_TOP (259)           // Верхня межа лічильника таймера 1 (для 62.5
кГц сигналу)
#define USE_3V3_AREF (1)           // Якщо живлення через USB – використовуємо 3.3V
як опорну напругу для АЦП

// Визначення цифрових пінів
const int encoderButtonPin = 2; // Кнопка енкодера
const int earpiecePin = 3; // Вихід звукового сигналу (використовується таймер 2)
const int T0InputPin = 4; // Подається імпульс з таймера 1 на таймер 0
const int coilDrivePin = 5; // Котушка передачі (PWM із таймера 0)
const int LcdPowerPin = 8; // Живлення дисплея
const int T0OutputPin = 9; // Зв'язок таймерів (TIMER1 → TIMER0)
// Аналогові входи
const int receiverInputPin = 0; // Сигнал від приймальної котушки
const int encoderAPin = A1; // Енкодер (сигнал A)
const int encoderBpin = A2; // Енкодер (сигнал B)

// Змінні для обробки сигналів у фазах (по 45°)
int16_t bins[4]; // Бін (накопичувач) для АЦП-значень по 4
фазах
volatile int16_t averages[4]; // Усереднені значення (оновлюються по
завершенню зразка)
int16_t calib[4]; // Значення калібрування для кожної фази

uint16_t numSamples = 0; // Лічильник кількості зразків
const uint16_t numSamplesToAverage = 1024; // Скільки зразків усереднювати

volatile uint32_t ticks = 0; // Системний лічильник
volatile bool sampleReady = false; // Прапорець – нові дані готові

// Змінні для перевірки правильності роботи таймерів
volatile uint8_t lastctr;
volatile uint16_t misses = 0; // Лічильник промахів (переповнення)

const double halfRoot2 = sqrt(0.5); // Для обчислень гармонік
const double radiansToDegrees = 180.0 / 3.1415927;
const float phaseAdjust = (45.0 * 32.0) / (float)(TIMER1_TOP + 1); // Поправка
фази АЦП
```

```

float threshold = 5.0; // Порогове значення амплітуди для індикації
                          виявлення металу

void setup()
{
    lcd.begin(16, 2); // Ініціалізація LCD 16x2
    pinMode(encoderButtonPin, INPUT_PULLUP); // Кнопка енкодера з підтяжкою
    // Підготовка пінів для формування сигналу керування котушкою
    digitalWrite(T0OutputPin, LOW);
    pinMode(T0OutputPin, OUTPUT); // Подача імпульсів з таймера 1 на таймер 0
    digitalWrite(coilDrivePin, LOW);
    pinMode(coilDrivePin, OUTPUT); // Вихідний сигнал на передаючу котушку
    cli(); // Вимикаємо глобальні переривання на час конфігурації
    // Зупинка таймера 0 (перевизначаємо його налаштування від Arduino core)
    TCCR0B = 0; // Зупинка таймера
    TIMSK0 = 0; // Вимикаємо переривання таймера 0
    TIFR0 = 0x07; // Скидаємо всі прапорці переривань таймера 0
    //Налаштування АЦП (ADC)
    #if USE_3V3_AREF
        ADMUX = (1 << ADLAR); // Вибір AREF (3.3В) як опорної напруги
    #else
        // Використання AVcc як опори
        ADMUX = (1 << REFS0) | (1 << ADLAR);
    #endif
    // Автотригер: запуск від переповнення TIMER1
    ADCSRB = (1 << ADTS2) | (1 << ADTS1);
    // Вмикаємо АЦП, автозапуск, дільник 16
    ADCSRA = (1 << ADEN) | (1 << ADSC) | (1 << ADIF) | (1 << ADIFSC);
    DIDR0 = 1; // Вимикаємо цифровий вхід на A0 для зменшення шуму
    // Налаштування TIMER1 для генерації 62.5 кГц
    // Фазово-коректний PWM, OC1A увімкнений
    TCCR1A = (1 << COM1A1) | (1 << WGM11);
    // CTC режим, без дільника
    TCCR1B = (1 << WGM12) | (1 << WGM13) | (1 << CS10);
    // ШІМ на половину циклу
    OCR1AH = (TIMER1_TOP/2 >> 8); OCR1AL = (TIMER1_TOP/2 & 0xFF);
    ICR1H = (TIMER1_TOP >> 8); ICR1L = (TIMER1_TOP & 0xFF); // TOP
    TCNT1H = 0; TCNT1L = 0; // Обнулення лічильника
    TIFR1 = 0x07; // Скидання прапорців
    TIMSK1 = (1 << TOIE1); // Дозвіл переривання по переповненню TIMER1
    // Налаштування TIMER0 – керування передавальною котушкою
    TCCR0A = (1 << COM0B1) | (1 << WGM01) | (1 << WGM00); // Fast PWM, вивід на
OC0B (D5)
    TCCR0B = (1 << CS00) | (1 << CS01) | (1 << CS02) | (1 << WGM02); // Джерело –
T0
    OCR0A = 7; OCR0B = 3; TCNT0 = 0;
    sei(); // Увімкнення глобальних переривань
    while (!sampleReady) {} // Очікуємо перше зчитування АЦП
    misses = 0;
}

```

```

    sampleReady = false;
    Serial.begin(19200); // Серійний порт для діагностики
}

ISR(TIMER1_OVF_vect)
{
    ++ticks; // Системний тік

    uint8_t ctr = TCNT0; // Зчитуємо фазу (0...7)
    int16_t val = (int16_t)(uint16_t)ADCH; // Зчитування 8 старших бітів АЦП

    // Перевірка на пропуск фази
    if (ctr != ((lastctr + 1) & 7)) {
        ++misses;
    }
    lastctr = ctr;

    int16_t *p = &bins[ctr & 3];
    if (ctr < 4) {
        *p += val;
        if (*p > 15000) *p = 15000;
    } else {
        *p -= val;
        if (*p < -15000) *p = -15000;
    }

    if (ctr == 7) {
        ++numSamples;
        if (numSamples == numSamplesToAverage) {
            numSamples = 0;
            if (!sampleReady) {
                memcpy((void*)averages, bins, sizeof(averages));
                sampleReady = true;
            }
            memset(bins, 0, sizeof(bins)); // Скидання для наступного циклу
        }
    }
}

void loop()
{
    while (!sampleReady) {} // Чекаємо, поки з'являться нові дані від АЦП
    uint32_t oldTicks = ticks; // Зберігаємо час початку обробки
    if (digitalRead(encoderButtonPin) == LOW)
    {
        // Якщо натиснута кнопка – запускається калібрування:
        // зберігаємо поточні значення фазових детекторів як «нульовий рівень» (фон)
        for (int i = 0; i < 4; ++i) {
            calib[i] = averages[i];
        }
    }
}

```

```

}
sampleReady = false;
Serial.print("Calibrated: ");
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Calibrating... ");
for (int i = 0; i < 4; ++i) {
    Serial.write(' ');
    Serial.print(calib[i]);
}
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(' ');
lcd.print(calib[4]); // Потенційна помилка: індекс 4 – поза межами [0..3]
lcd.print("      ");
Serial.println();
}
else
{
    // Коригування з урахуванням фонових значень (віднімання калібрування)
    for (int i = 0; i < 4; ++i) {
        averages[i] -= calib[i];
    }
    const double f = 200.0;
    // Фазова обробка для подавлення гармонік та нормалізації значень
    double bin0 = (averages[0] + halfRoot2 * (averages[1] - averages[3])) / f;
    double bin1 = (averages[1] + halfRoot2 * (averages[0] + averages[2])) / f;
    double bin2 = (averages[2] + halfRoot2 * (averages[1] + averages[3])) / f;
    double bin3 = (averages[3] + halfRoot2 * (averages[2] - averages[0])) / f;
    sampleReady = false; // Дозволяємо ISR знову оновлювати averages[]
    // Обчислення амплітуд за парами фаз (дві незалежні оцінки)
    double amp1 = sqrt((bin0 * bin0) + (bin2 * bin2));
    double amp2 = sqrt((bin1 * bin1) + (bin3 * bin3));
    double ampAverage = (amp1 + amp2) / 2.0;
    // Обчислення фаз (у градусах), враховуючи зсув вибірки АЦП
    double phase1 = atan2(bin0, bin2) * radiansToDegrees + 45.0;
    double phase2 = atan2(bin1, bin3) * radiansToDegrees;
    // Упорядкування фаз
    if (phase1 > phase2) {
        double temp = phase1;
        phase1 = phase2;
        phase2 = temp;
    }
    // Середнє значення фази + компенсація фазового зсуву вибірки
    double phaseAverage = ((phase1 + phase2) / 2.0) - phaseAdjust;
    if (phase2 - phase1 > 180.0)
    {
        if (phaseAverage < 0.0)
            phaseAverage += 180.0;
        else
            phaseAverage -= 180.0;
    }
}

```

```

// Вивід даних у консоль для діагностики
Serial.print(misses); Serial.write(' ');
Serial.print(bin0, 2); Serial.write(' ');
Serial.print(bin1, 2); Serial.write(' ');
Serial.print(bin2, 2); Serial.write(' ');
Serial.print(bin3, 2); Serial.print("    ");
Serial.print(amp1, 2); Serial.write(' ');
Serial.print(amp2, 2); Serial.write(' ');
Serial.print(phase1, 2); Serial.write(' ');
Serial.print(phase2, 2); Serial.print("    ");
Serial.print(ampAverage, 1); Serial.write(' ');

// Вивід амплітуди на LCD
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("          "); // Очищення рядка
lcd.print(ampAverage);
lcd.setCursor(0, 1);
lbg.drawValue(ampAverage, max_ampAverage); // Графік амплітуди

Serial.print((int)phaseAverage); // Вивід середньої фази

// Класифікація металу
if (ampAverage >= threshold)
{
    // Інтерпретація:
    // - фаза < -20° → ймовірно неферромагніт (мідь, алюміній)
    // - фаза ≈ 0° → ферромагніт (залізо)
    if (phaseAverage < -20.0)
    {
        Serial.print(" Non-ferrous");
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("NonFerrous ");
    }
    else
    {
        Serial.print(" Ferrous");
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Ferrous    ");
    }
}

// Генерація тону для звукової сигналізації (частота залежить від
амплітуди)
float temp = ampAverage;
int thisPitch = map(temp, 10, 200, 100, 1500); // Частота тону в діапазоні
100–1500 Гц
tone(3, thisPitch, 120); // Вивід тону на пін 3 (навушники/зумер)
// Вивід сигналу у консоль ('!' × кількість перевищення порогу)
while (temp > threshold)
{

```

```
        Serial.write('!');
        temp -= (threshold / 2.0);
    }
}

Serial.println();
}

// Пауза між зчитуваннями (125 Гц оновлення)
while (ticks - oldTicks < 8000) {
    // Очікування наступного циклу (~125 Гц, тобто 8 мс)
}
}
```