

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
інститут інформаційних технологій
кафедра інформаційно телекомунікаційних технологій та систем

Гринішак Володимир Степанович

621-757.6:681.5

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**Розроблення інформаційної системи виявлення металевих предметів
для забезпечення безпеки об'єктів громадського користування**

Інформаційні технології

126 - Інформаційні системи та технології

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня _____ В.С. Гринішак
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ В.Б. Могилін
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

В. о. завідувача кафедри ІТТС _____ О.Л. Заміховська,
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційно- телекомунікаційних технологій і систем

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. зав. кафедри ІТТС к.т.н., доц.
_____ О. Л. Заміховська

«____» _____ 2026 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Гринішак Володимир Степанович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення інформаційної системи виявлення металевих предметів для забезпечення безпеки об'єктів громадського користування

керівник роботи, асист. каф. ІТТС Могилін В.Б.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від "07" квітня 2026 року № 163/7

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи метод детекції металу за принципом передачі прийому придатний для стаціонарного використання

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Аналіз методів та засобів виявлення металевих предметів; Розробка арочного металодетектора; Розробка програмного забезпечення та алгоритмів роботи арочного металодетектора

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

КРБ.ІСТ.06.00.00.001 Зміни магнітного поля при наявності металевих тіл

КРБ.ІСТ.06.00.00.002 Принцип компенсації первинного поля металодетектора котушкою компенсації

КРБ.ІСТ.06.00.00.003 Виявлення рухомого руху металевих об'єктів при нерухомій системі

КРБ.ІСТ.06.00.00.004 Структурна схема системи

КРБ.ІСТ.06.00.00.005 Діаграма станів автомата металодетектора

КРБ.ІСТ.06.00.00.006 Алгоритм роботи системи

КРБ.ІСТ.06.00.00.007 Вид вікна сервісної програми керування

6. Дата видачі завдання 01 травня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз методів та засобів виявлення металевих предметів</i>	05.05.2026-10.05.2026	<i>Виконано</i>
2	<i>Розробка апаратного металодетектора</i>	11.05.2026-25.05.2026	<i>Виконано</i>
3	<i>Розробка програмного забезпечення та алгоритмів роботи апаратного металодетектора</i>	25.05.2026-30.05.2026	<i>Виконано</i>
4	<i>Оформлення роботи</i>	11.06.2026-17.06.2026	<i>Виконано</i>

Студент

(підпис)

Гринішак В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Могилін В.Б

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота складається з 3 розділів, 24 рисунків, загальний обсяг БР 85 сторінок, в роботі використано 16 літературних джерел.

Тема бакалаврської роботи: Розроблення інформаційної системи виявлення металевих предметів для забезпечення безпеки об'єктів громадського користування.

Мета роботи: розробка інформаційної системи виявлення металевих предметів на основі електромагнітного методу із застосуванням компенсаційних котушок та дистанційного керування.

Об'єкт дослідження: стаціонарні системи виявлення металевих об'єктів, що використовують принцип електромагнітної індукції.

Предмет дослідження: схеми компенсації первинного поля, алгоритми фільтрації сигналів та методи передачі даних для віддаленого моніторингу.

Результати бакалаврської роботи: Проаналізовано фізичні принципи взаємодії металів із електромагнітним полем та досліджено вплив геометричних параметрів і електромагнітних властивостей металів на вихідний сигнал детектора. Обґрунтовано використання двокаскадних інтеграторів та фільтрів руху для селекції динамічної складової сигналу. Розроблено структурну та принципову схеми аروحного металодетектора. Спроековано систему генерації синусоїдального сигналу та вузол синхронного детектування. Створено робочу схему аروحного металодетектора на базі мікроконтролера STM32G431. Розроблено вузол компенсації, що дозволяє зменшити фоновий сигнал, та реалізовано систему дистанційного керування через модуль ESP01.

Ключові слова: АРОЧНИЙ МЕТАЛОДЕТЕКТОР, ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МЕТОД, КОМПЕНСАЦІЙНА КОТУШКА, СИНХРОННЕ ДЕТЕКТУВАННЯ, STM32G431, ESP01, ФІЛЬТРАЦІЯ СИГНАЛІВ, ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of 3 chapters, 24 figures, total volume of 85 pages, 16 literature sources are used in the work.

Bachelor's thesis topic: Development of an information system for metal object detection to ensure the security of public facilities.

Objective of the work: development of an information system for detecting metal objects based on the electromagnetic method using compensation coils and remote control.

Object of research: stationary systems for detecting metal objects based on the electromagnetic induction principle.

Subject of research: primary field compensation circuits, signal filtering algorithms, and data transmission methods for remote monitoring.

Results of the bachelor's thesis: The physical principles of metals' interaction with an electromagnetic field were analyzed, and the influence of geometric parameters and electromagnetic properties of metals on the detector's output signal was investigated. The use of two-stage integrators and motion filters for the selection of the dynamic signal component was justified. Structural and schematic diagrams of a walk-through metal detector were developed. A sinusoidal signal generation system and a synchronous detection node were designed. A working circuit of a walk-through metal detector based on the STM32G431 microcontroller was created. A compensation node allowing to reduce the background signal was developed, and a remote control system via the ESP01 module was implemented.

Keywords: WALK-THROUGH METAL DETECTOR, ELECTROMAGNETIC METHOD, COMPENSATION COIL, SYNCHRONOUS DETECTION, STM32G431, ESP01, SIGNAL FILTERING, REMOTE CONTROL.

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ПРЕДМЕТІВ	9
1.1 Еволюція методів виявлення металевих предметів	9
1.2 Сучасні металодетектори: класифікація та функціональні можливості.....	15
1.3 Фактори, що ускладнюють виявлення металевих предметів.....	19
1.4 Обґрунтування доцільності електромагнітного методу виявлення.	24
2 РОЗРОБКА АРОЧНОГО МЕТАЛОДЕТЕКТОРА	29
2.1 Принцип виявлення металевих предметів на фоні навколишнього середовища	29
2.2 Розробка структурної схеми стаціонарного аrochenого металодетектора	37
2.3 Розробка принципових схем вузлів стаціонарного аrochenого металодетектора	39
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ АРОЧНОГО МЕТАЛОДЕТЕКТОРА	50
3.1 Загальний алгоритм функціонування системи	50
3.2 Алгоритм ініціалізації вузлів переривань, генераторів, АЦП, переривань по оптодатчиках.....	54
3.3 Алгоритм визначення середнього рівня і відхилення від середнього	57
3.4 Алгоритм обробки сигналів перевищення	60
3.5 Алгоритм роботи веб-сервера доступу на базі ESP01	63

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Розроблення інформаційної системи виявлення металевих предметів для забезпечення безпеки об'єктів громадського користування	Лім.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Гринішак В. С.				Н	5	85
Перевір.		Могилін В. Б.				ІФНТУНГ ІСТ-22-1		
Н. контр.		Возний А. В.						
Затверд.		Заміховська О.Л.						

3.6 Програмна реалізація системи	70
3.7 Інтеграція ESP01 з мікроконтролером STM32.....	77
ВИСНОВКИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	84
ДОДАТКИ	86

ВСТУП

Актуальність дослідження. Забезпечення безпеки в аеропортах, судах та інших місцях масового скупчення людей вимагає використання надійних засобів виявлення прихованої зброї та заборонених предметів. Сучасні вимоги до таких систем передбачають високу пропускну здатність, низьку ймовірність хибних спрацювань та безпеку для людини. Існуючі електромагнітні металодетектори часто стикаються з проблемою перешкод від навколишнього середовища та складністю виявлення малих об'єктів на фоні масивних металоконструкцій будівель. Задача підвищення чутливості та вибіркової детекторів шляхом вдосконалення апаратної частини та алгоритмів цифрової обробки сигналів є актуальною для розробки систем безпеки нового покоління.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є розробка інформаційної системи виявлення металевих предметів на основі електромагнітного методу із застосуванням компенсаційних котушок та дистанційного керування.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

- проаналізувати фізичні принципи взаємодії металів із електромагнітним полем;
- розробити структурну та принципову схеми апарату металодетектора;
- спроектувати систему генерації синусоїдального сигналу та вузол синхронного детектування;
- розробити програмне забезпечення для мікроконтролера та веб-інтерфейс для налаштування системи.

Об'єкт дослідження: стаціонарні системи виявлення металевих об'єктів, що використовують принцип електромагнітної індукції. Предмет

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

дослідження: схеми компенсації первинного поля, алгоритми фільтрації сигналів та методи передачі даних для віддаленого моніторингу.

Методи дослідження. У роботі використано метод системного аналізу для огляду існуючих технологій детектування. Математичне моделювання застосовано для розрахунку параметрів активних фільтрів та частот зрізу інтегруючих ланок. Методи схемотехнічного проектування використані для створення аналогового тракту, а принципи об'єктно-орієнтованого програмування та мережевих протоколів — для реалізації програмної частини системи.

Теоретичні та практичні результати роботи.

Теоретичне значення полягає у дослідженні впливу геометричних параметрів та електромагнітних властивостей металів на вихідний сигнал детектора. Обґрунтовано використання двокаскадних інтеграторів та фільтрів руху для селекції динамічної складової сигналу.

Практичне значення роботи полягає у створенні робочої схеми аручного металодетектора на базі мікроконтролера STM32G431. Розроблено вузол компенсації, що дозволяє зменшити фоновий сигнал, та реалізовано систему дистанційного керування через модуль ESP01. Результати можуть бути використані при проектуванні стаціонарних постів контролю на об'єктах громадського користування.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ПРЕДМЕТІВ

1.1 Еволюція методів виявлення металевих предметів

1.1.1 Механічні та примітивні засоби пошуку (щупи, зонди, стрижні)

Найдавніші методи виявлення металевих предметів у ґрунті або в тілі людини ґрунтувалися на прямому механічному контакті. Металеві щупи та зонди — прості стрижні з загостреним кінцем — використовувалися ще в давні часи для пошуку закопаних предметів. При натраплянні щупа на твердий металевий предмет оператор відчував характерний опір, що відрізнявся від ґрунту або органічних матеріалів.

У воєнний час методи щупового пошуку застосовувалися для виявлення мін та боєприпасів. Піонери-сапери використовували довгі металеві стрижні, якими методично зондували ґрунт під малим кутом. Незважаючи на примітивність, цей метод зберігав своє значення аж до середини ХХ століття через надійність і незалежність від будь-якого обладнання [3]. Проте його очевидні недоліки — низька швидкість, необхідність прямого контакту, неможливість виявлення предметів на значній глибині та небезпека для оператора — визначили пошук більш ефективних засобів.

Металевий стрижень-щуп залишається у вжитку й сьогодні, але виключно як допоміжний засіб при ручному огляді підозрілих осіб у місцях позбавлення волі або для первинного огляду ґрунту перед застосуванням електронного детектора. В медичній практиці зондування металевих предметів, що потрапили в порожнини тіла, також мало місце до впровадження рентгенографії, хоча такі процедури були болісними та небезпечними.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

Простим різновидом механічного виявлення є метод ручного обшуку — систематичне прощупування тіла та речей підозрюваного. Цей метод сьогодні є обов'язковим доповненням до електронного огляду і регламентований процесуальним законодавством більшості країн. Його перевага — відсутність «мертвих зон» і здатність виявляти будь-які предмети незалежно від їх матеріалу; недолік — тривалість, суб'єктивність та вимога однакової статі оператора і підозрюваного.

1.1.2 Акустичні та вібраційні методи

Акустичні методи виявлення базуються на аналізі характеристик звукового або ультразвукового сигналу, що поширюється через матеріал і відбивається або поглинається металевими включеннями. Ці методи знайшли широке застосування насамперед у промисловій дефектоскопії — виявленні тріщин, порожнин та сторонніх включень у матеріалах і конструкціях [6].

Ультразвукова дефектоскопія використовує частоти від 0,5 до 25 МГц. Імпульс ультразвуку, введений у досліджуваний об'єкт, відбивається від неоднорідностей (у тому числі від металевих включень) і повертається до приймача з певною затримкою. За часом затримки визначають відстань до включення, а за амплітудою відбитого сигналу — його розміри. Метод надзвичайно чутливий і дозволяє виявляти дефекти розміром від десятих часток міліметра.

Однак для задач виявлення прихованої зброї або металевих предметів на тілі людини або в багажі акустичні методи мають суттєві обмеження. По-перше, для ультразвукового контролю необхідний щільний акустичний контакт між перетворювачем і об'єктом, що вимагає застосування контактних рідин і унеможливорює дистанційний огляд. По-друге, акустичні властивості тіла людини (через складну неоднорідну структуру тканин) дають надмірно складний сигнал, виокремити з якого відгук від металевого предмета вкрай важко без спеціалізованих алгоритмів обробки.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Тим не менш, акустичні методи зберігають практичне значення у вузьких прикладних задачах: ультразвукове сканування портових контейнерів для виявлення прихованих порожнин зі зброєю або контрабандою; акустична емісія для моніторингу структурної цілісності металевих конструкцій безпеки (ґрати, броньовані двері); резонансний аналіз для виявлення металевих предметів у харчових продуктах на виробничих лініях.

1.1.3 Радіографічний метод (рентгенівське випромінювання)

Відкриття рентгенівського випромінювання Вільгельмом Конрадом Рентгеном у 1895 році докорінно змінило підходи до виявлення прихованих об'єктів. Вже через кілька тижнів після публікації результатів рентгенівське випромінювання було застосоване в медицині для виявлення куль і металевих осколків у пораненнях. Перший промисловий рентгенівський апарат для огляду вантажів з'явився в середині ХХ ст.

Принцип роботи рентгенографічного методу ґрунтується на різниці в коефіцієнтах поглинання рентгенівського випромінювання різними матеріалами. Колімований пучок рентгенівських фотонів проходить крізь об'єкт огляду і реєструється детектором (у класичній радіографії — рентгенівською плівкою, у цифрових системах — лінійними або матричними детекторами на основі сцинтиляторів або прямих перетворювачів). Металеві об'єкти, маючи вищий атомний номер і щільність, поглинають більшу частку фотонів і утворюють чіткі затінені ділянки на зображенні.

Сучасні рентгенівські системи огляду багажу в аеропортах і на залізничних вокзалах використовують двоенергетичне опромінення (зазвичай 80 і 140 кВ). Обробляючи різницю зображень при двох енергіях, система визначає ефективний атомний номер матеріалу для кожної ділянки зображення і відображає результат у псевдо кольоровому форматі: органіка — помаранчевим, метали — синім, змішані матеріали — зеленим. Це

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

суттєво полегшує роботу оператора і підвищує ймовірність виявлення загрози.

Продуктивність сучасних систем рентгенівського огляду може становити від 600 до понад 1200 одиниць багажу за годину при розмірі тунелю до 1000×1000 мм. Роздільна здатність дозволяє виявляти металеві предмети масою від 1–2 грамів. Для ручної поклажі застосовуються системи з меншими тунелями (наприклад, 650×500 мм) і вищою роздільною здатністю.

Суттєвим обмеженням рентгенівського методу є необхідність проходження випромінювання крізь об'єкт — неможливо отримати зображення «наскрізь» за наявності густого металевго екрана. Крім того, двовимірна рентгенограма не дає інформації про глибину залягання предмета у контейнері, що ускладнює розпізнавання замаскованих загроз. Для вирішення цих проблем розроблено комп'ютерну томографію.

1.1.4 Комп'ютерна томографія та 3D-сканування

Комп'ютерна томографія (КТ) є якісно новим кроком у розвитку радіаційних методів виявлення. На відміну від класичної рентгенографії, що дає двовимірну проекцію об'єкта, КТ дозволяє реконструювати повноцінне тривимірне зображення внутрішньої структури об'єкта та визначити локальні значення лінійного коефіцієнта поглинання для кожного елементарного об'єму (вокселя).

Принцип КТ полягає в отриманні великої кількості (зазвичай кількасот) рентгенівських проекцій об'єкта під різними кутами (від 0° до 180° або 360°), після чого спеціалізоване програмне забезпечення відновлює тривимірну структуру за допомогою алгоритмів зворотного проектування або ітеративної реконструкції. У медицині такі системи давно стали стандартом, однак їх застосування для огляду багажу стало можливим лише після суттєвого збільшення швидкодії.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Томографічні системи огляду багажу нового покоління, що впроваджуються в аеропортах ЄС та США відповідно до вимог безпеки ИКАО, дозволяють автоматично виявляти вибухові речовини та зброю без необхідності виймати ноутбуки та рідини з сумок. Алгоритми машинного навчання, навчені на тисячах прикладів загроз, аналізують тривимірне зображення в реальному часі та генерують сигнал тривоги при виявленні підозрілих об'єктів. Продуктивність таких систем досягає 300–500 одиниць багажу за годину при повному 3D-скануванні.

Для огляду автомобілів, вантажних контейнерів і залізничних вагонів розроблені великогабаритні КТ-системи на основі лінійних прискорювачів електронів, що генерують випромінювання з енергією 2–9 МеВ. Такі системи дозволяють прозвучувати вантажі з густиною до кількох тонн на квадратний метр проекційної площі. Швидкість сканування вантажівки становить від 1 до 3 хвилин.

Методи 3D-сканування поверхні (лазерне сканування, структуроване світло) застосовуються для виявлення аномалій форми об'єктів, що можуть свідчити про приховані металеві предмети. Зокрема, системи персонального огляду на основі активних міліметрових хвиль (АМХ) або терагерцового випромінювання формують тривимірне зображення контурів тіла людини і виявляють підозрілі ущільнення та опуклості під одягом незалежно від матеріалу прихованого предмета.

1.1.5 Порівняльна характеристика методів за критеріями точності, безпеки та вартості

Кожен із розглянутих методів виявлення має власну область доцільного застосування, визначену набором критеріїв: чутливість і специфічність, швидкодія, безпека для персоналу та відвідувачів, вартість придбання і експлуатації, портативність, вимоги до кваліфікації оператора.

Механічні методи (щупи, ручний огляд) не потребують жодного обладнання та мають нульову вартість технічних засобів, однак вони

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

повільні, потребують фізичного контакту, залежать від людського фактора і не придатні для масового потоку відвідувачів. Їх роль — доповнення до електронних систем при проведенні детального огляду після спрацювання сигналізації.

Рентгенографічні методи забезпечують високу пропускну здатність (до 1200 одиниць/год), чудову роздільну здатність та можливість ідентифікації матеріалів. Проте вони потребують стаціонарного встановлення та підключення до електромережі, вимагають дотримання радіаційного захисту, мають вартість від 50 до 500 тисяч євро за одиницю та потребують ліцензування та регулярного дозиметричного контролю. Для огляду багажу — оптимальний вибір; для особистого огляду людей — неприйнятний через дозиметричні обмеження (крім спеціальних систем зворотного розсіювання з мінімальними дозами).

Комп'ютерна томографія перевершує звичайну рентгенографію за точністю виявлення та ідентифікації, однак коштує від 500 тисяч до кількох мільйонів євро, має нижчу пропускну здатність і потребує складного технічного обслуговування. Доцільна для аеропортів найвищого рівня безпеки.

Електромагнітні детектори (вихрострумові та індукційні) займають оптимальну нішу для особистого огляду відвідувачів: вони безпечні (не мають іонізуючого випромінювання), відносно недорогі (від кількох тисяч до десятків тисяч євро), компактні, мають високу пропускну здатність (до кількох сотень осіб за годину для арочних конструкцій) і не потребують спеціального ліцензування [1, 4].

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

1.2 Сучасні металодетектори: класифікація та функціональні можливості

1.2.1 Класифікація металодетекторів

Металодетектори, що застосовуються у сфері безпеки, поділяються на кілька основних класів залежно від конструктивного виконання, методу збудження та принципу обробки сигналу. Правильний вибір класу детектора визначається завданням безпеки, інтенсивністю потоку людей та вимогами до рівня чутливості.

Арочні (стаціонарні прохідні) металодетектори — найпоширеніший тип у місцях масового скупчення людей. Являють собою П-подібну конструкцію шириною 70–90 см і висотою 2–2,3 м, що утворює контрольований прохід. Котушки передавача і приймача вбудовані в бічні панелі або розподілені по всьому периметру арки. Більшість сучасних моделей має від 8 до 33 незалежних зон виявлення по висоті, що дозволяє локалізувати металевий предмет у певній ділянці тіла (голова/шия, торс, пояс, гомілка) [1, 4].

Ручні металодетектори (сканери-«лопатки») застосовуються як доповнення до арочних або самостійно при індивідуальному огляді. Компактний корпус містить котушку збудження та приймальну котушку невеликого діаметра (5–15 см), що забезпечує точну локалізацію металевих предметів при проведенні детектором уздовж тіла з відстані 1–5 см [1]. Сигналізація — звукова та/або вібраційна; деякі моделі мають світлодіодну індикацію з відображенням інтенсивності сигналу.

Підлогові та підкладні детектори (підкладні панелі, коврики) встановлюються у підлозі або під килимовим покриттям у зонах проходу та виявляють металеві предмети, заховані у взутті або пришиті до підошви. Особливо актуальні для об'єктів підвищеної безпеки, де відомі випадки проносу зброї у взутті.

Портативні пошукові детектори призначені для пошуку металевих предметів у ґрунті, снігу, воді або будівельних конструкціях. Використовуються піротехнічними службами, митними органами та спеціальними підрозділами. Характеризуються глибиною виявлення від 0,3 до 1,5 м залежно від розміру об'єкта та типу ґрунту.

Транспортні детектори (тунельного типу) призначені для огляду транспортних засобів, контейнерів та вантажів. Можуть бути стаціонарними (вбудованими в контрольний пункт) або пересувними (змонтованими на спеціальному транспортному засобі). Відрізняються великими розмірами котушок і потужністю збудника, що забезпечує можливість виявлення металевих предметів крізь шар вантажу та конструкцію автомобіля.

1.2.2 Основні функції та технічні характеристики

Сучасні системи безпеки на базі металодетекторів реалізують набагато ширший функціонал, ніж просто фіксацію присутності металевого предмета. Прогрес у цифровій обробці сигналів і мікропроцесорній техніці дозволив реалізувати в компактних і відносно доступних пристроях функції, що раніше були доступні лише у дорогих лабораторних приладах [2].

Багатозонне виявлення дає змогу розподілити чутливу зону аroachного детектора на 8–33 незалежних горизонтальних смуги. Кожна зона незалежно обробляє сигнал і формує власне рішення про наявність металу. На дисплеї панелі керування схематично відображається силует людини з підсвічуванням зон спрацювання, що дозволяє оператору миттєво визначити приблизне місцезнаходження підозрілого предмета і провести цілеспрямований ручний огляд.

Функція дискримінації матеріалів (частково) реалізована у ряді детекторів і дозволяє налаштувати поріг реакції окремо на феромагнітні та немагнітні метали. Це дає змогу, наприклад, пропускати дрібні монети чи ключі, не знижуючи чутливості до пістолетів або ножів. Однак повноцінна

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

дискримінація матеріалів, порівняння з рентгенографічними системами, на металодетекторах фізично обмежена і є предметом активних наукових досліджень.

Цифрова фільтрація сигналу та компенсація завад реалізовані у всіх якісних промислових детекторах. Адаптивні алгоритми відстежують фоновий рівень електромагнітних завад і автоматично коригують пороги спрацювання, запобігаючи хибним тривогам через сторонні джерела ЕМП, підлогові конструкції з металу або нерівності магнітного поля Землі.

Статистика та журнал подій — обов'язкова функція детекторів для серйозних об'єктів безпеки. Система зберігає дані про кожне спрацювання (час, зона, інтенсивність сигналу), що дає змогу аналізувати завантаженість пункту контролю, виявляти закономірності та розслідувати інциденти. Ряд систем підтримує інтеграцію з відеонаглядом і автоматично прив'язує сигнал тривоги до відеозапису з відповідного ракурсу.

Дистанційне керування та мережева інтеграція дозволяють централізовано керувати параметрами та отримувати дані з кількох детекторів через корпоративну мережу. Для об'єктів з декількома контрольними пунктами (великі аеропорти, стадіони) це суттєво спрощує управління безпекою і дозволяє швидко перенастроювати всі пристрої при зміні рівня загрози.

1.2.3 Режими чутливості та дискримінації металів

Налаштування чутливості металодетектора є ключовим балансом між двома конкуруючими вимогами: максимальною ймовірністю виявлення загрози (висока чутливість) та мінімальним числом хибних тривог (висока специфічність) [2, 4]. Надмірна чутливість призводить до затримок у черзі через реакцію на нейтральні металеві предмети; недостатня — збільшує ризик пропуску зброї.

Сучасні детектори пропонують від 10 до 99 ступенів регулювання чутливості, які на практиці зводяться до декількох попередньо

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

налаштованих профілів: «максимальна безпека» (аеропорт, суд), «стандарт» (торговий центр, стадіон), «знижена» (музей, офісний центр). Кожен профіль задає набір порогів для різних зон та типів сигналів.

Деякі детектори реалізують частотний аналіз сигналу для приблизного визначення провідності металу. При низьких частотах збудження (2–5 кГц) добре виявляються феромагнітні матеріали; при високих (15–30 кГц) — кольорові метали (алюміній, мідь). Системи з мультичастотним збудженням одночасно аналізують відгук на кількох частотах, що підвищує точність дискримінації та зменшує кількість хибних тривог.

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) застосовується у найсучасніших детекторах і передбачає використання кількох незалежних передавачів і приймачів у різних точках арки. Це дозволяє отримати просторовий розподіл сигналу і більш точно відновити форму та орієнтацію металевого об'єкта, що значно підвищує ймовірність правильної класифікації.

1.2.4 Застосування у громадських місцях: аеропорти, суди, стадіони

Різні категорії громадських об'єктів висувають специфічні вимоги до систем виявлення металів, зумовлені інтенсивністю потоків, рівнем загрози та особливостями контингенту відвідувачів.

Аеропорти є об'єктами найвищого рівня вимог до безпеки. Стандарти ИКАО (Додаток 17) та регулювання ЄС (ЕС 300/2008) встановлюють обов'язкове 100% сканування пасажирів і ручної поклажі. Арочні детектори у аеропортах налаштовуються на максимальну чутливість і повинні відповідати стандарту ECAS Doc 30, що визначає еталонні тест-об'єкти (пістолет, ніж, граната) та мінімальну ймовірність їх виявлення. Пропускна здатність одного арочного детектора — до 600–900 осіб за годину залежно від наявності попереднього скринінгу документів.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Суди і установи виконання покарань — другий за рівнем безпеки клас об'єктів. Тут вимога абсолютного виключення проносу металевої зброї поєднується з відносно невисоким потоком відвідувачів, що дозволяє працювати на підвищеній чутливості без суттєвого впливу на пропускну здатність. Особливістю є обов'язкове застосування ручних детекторів як другого рубежу огляду після арки.

Стадіони та масові заходи потребують забезпечення безпеки для десятків тисяч осіб за короткий час (1–2 години до початку заходу). Це означає розгортання великої кількості паралельних ліній контролю — від 20 до 60 і більше аличних детекторів для стадіону на 50 тисяч місць. Детектори налаштовуються на знижену чутливість для пропуску дрібних металевих предметів (ключі, монети, пряжки), зберігаючи реакцію на великогабаритні металеві об'єкти. Для зменшення черг часто застосовуються мобільні ручні детектори для попереднього огляду.

Торгові центри та офісні будівлі, залежно від рівня загрози, можуть застосовувати як стаціонарні пости постійного контролю, так і мобільні пости з ручними детекторами, що розгортаються при підвищенні рівня небезпеки. Тут особливо актуальна проблема хибних тривог, оскільки більшість відвідувачів несе велику кількість металевих предметів (смартфони, ноутбуки, ювелірні прикраси), і оператори відчувають значне психологічне навантаження.

1.3 Фактори, що ускладнюють виявлення металевих предметів

1.3.1 Вплив металовмісних елементів одягу та аксесуарів

Одним із найбільш практично значущих викликів при організації контролю потоків відвідувачів є велика кількість легальних металевих предметів, що несе кожна людина. Середньостатистичний відвідувач, що проходить через пункт контролю, має при собі від 50 до 300 грамів металу у різних формах: монети, ключі, мобільний телефон, ремінь, застібки на одязі,

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

годинник, ювелірні прикраси, окуляри в металевій оправі, медичні імплантати та ін.

Ці «фонові» металеві предмети є основним джерелом хибних тривог при підвищеній чутливості детектора. Операційна дилема полягає в тому, що зниження чутливості для уникнення хибних тривог одночасно знижує ймовірність виявлення небезпечних предметів малого розміру (наприклад, компактного складаного ножа, що важить менше 100 г).

Пряжки ременів, металеві кнопки та гудзики, рамки окулярів, піджаки з металевими нитками — все це формує характерні «підписи» сигналу, які алгоритми обробки намагаються відрізнити від загроз. Виробники детекторів накопичують бази даних сигнальних образів тисяч типових предметів і використовують ці бази для навчання алгоритмів класифікації.

Медичні імплантати є особливою категорією. Кардіостимулятори, штучні суглоби, металеві пластини та гвинти після остеосинтезу — всі вони генерують потужний металевий сигнал, що може бути хибно розцінений як загроза. Пацієнти з імплантатами, як правило, мають при собі відповідну медичну довідку, однак при великому потоці відвідувачів обробка таких виключень займає додатковий час.

Вирішення проблеми «легального металу» є одним із ключових напрямків розвитку детекторних систем. Перспективним підходом є реєстрація просторового розподілу металу на тілі людини при проходженні через детектор і порівняння отриманого «профілю» з типовими профілями безпечних відвідувачів. Відхилення від типового профілю (наприклад, наявність щільної локалізованої металевої маси в нетиповій зоні) генерує сигнал тривоги навіть за відсутності перевищення загального порогу [1].

1.3.2 Електромагнітні завади від зовнішніх джерел

Електромагнітне середовище сучасних громадських будівель надзвичайно насичене. Системи безперебійного електроживлення, перетворювачі частоти для ліфтових двигунів, зарядні станції для

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

електромобілів на паркінгу, системи освітлення з електронними баластами, WiFi-обладнання, мобільні радіобазові станції — все це є потенційними джерелами електромагнітних завад для металодетекторів.

Низькочастотні завади (10–100 Гц) від систем живлення та двигунів є найбільш поширеними. Вони можуть викликати «плаваючий» нульовий рівень детектора або хибні спрацювання при проходженні людей. Класичний спосіб боротьби — смугова фільтрація з виключенням частот мережі та їх гармонік, однак при збудженні детектора саме на цих частотах (що технічно переважно) доводиться застосовувати більш складні методи компенсації.

Радіочастотні завади (від кількох кГц до МГц) можуть генеруватися силовою електронікою, інверторами сонячних батарей, пристроями індукційного нагріву. Металодетектори, що працюють в діапазоні 5–25 кГц, особливо вразливі до завад у цьому діапазоні. Для підвищення завадостійкості застосовуються диференційне включення котушок (два приймачі з протилежною фазою, рознесені по простору), балансування котушок та цифрова синхронна детекція.

Рухомі металеві об'єкти поблизу детектора (автомобілі на парковці, ліфти, механізми воріт) створюють низькочастотні квазістатичні збурення магнітного поля, що детектор може помилково прийняти за сигнал від металевого предмета в зоні сканування [7]. Ця проблема особливо актуальна для детекторів, що встановлені у вестибюлях будівель з активним транспортним рухом поруч.

Геомагнітні варіації — добові та сезонні зміни магнітного поля Землі — можуть впливати на детектори, чутливі до постійного або наднизькочастотного поля. Хоча амплітуда геомагнітних варіацій мала (одиниці нТл), для детекторів з дуже високою чутливістю (пошукові системи для роззброєння) вони є значущим фоновим шумом.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1.3.3 Екранування та маскування металевих предметів

Окремою і особливо актуальною для практики безпеки проблемою є цілеспрямоване маскування металевих предметів з метою уникнення виявлення детектором. Знання про принципи роботи металодетекторів може бути використане зловмисниками для розробки методів обходу систем контролю.

Екранування провідними матеріалами — один із теоретично можливих, але практично складних методів. Оточення металевого предмета провідним, але немагнітним матеріалом (наприклад, алюмінієвою фольгою) частково перенаправляє вихрові струми в зовнішній екран, знижуючи сигнал від внутрішнього об'єкта. Проте для ефективного екранування маса екрана має бути порівнянна з масою предмета, що не знижує загальний металевий «підпис».

Дроблення металевих об'єктів на дрібні частини — метод, розрахований на зниження ефективної площі вихроштрумової взаємодії. Невеликий металевий предмет, розподілений по тілу або в різних частинах одягу, може не перевищити жодного з порогів чутливості навіть при збереженні загальної маси металу. Це стимулює розробників детекторів вдосконалювати алгоритми сумарного підрахунку сигналів з різних зон.

Пронесіння металевих предметів у взутті або в порожнинах тіла є традиційним методом обходу контролю. Підлогові детектори та застосування ручних сканерів при детальному огляді частково вирішують цю проблему, однак портативна зброя у взутті залишається актуальним виміром при оцінці вразливостей.

Використання зброї з мінімальним вмістом металу (пластикової або керамічної) є граничним випадком проблеми виявлення. Пластиковий пістолет з пластиковими патронами та мінімальною кількістю металевих деталей (бойок, пружина) практично невидимий для металодетекторів. Саме ці загрози стимулюють розвиток альтернативних методів виявлення —

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

терагерцового, мікрохвильового, рентгенівського — здатних виявляти не лише метал, а й пластик та вибухівку.

1.3.4 Вплив будівельних конструкцій та навколишнього середовища

Будівельні конструкції сучасних громадських будівель містять значну кількість металу: арматура залізобетонних плит та колон, металеві профілі підвісних стель, алюмінієві рами вікон і дверей, сталеві двутаври та швелери несучих каркасів. Весь цей метал утворює статичне фонове поле, на яке реагують детектори.

Металоконструкції в зоні встановлення детектора можуть суттєво деформувати конфігурацію первинного магнітного поля, погіршуючи рівномірність чутливості по перетину проходу. При встановленні арочного детектора поряд із металевою дверною коробкою або сталевими колонами система потребує спеціального налаштування та компенсації нерівномірного фону.

Підлоги з металевою арматурою під детектором є постійним джерелом фонових сигналів, що особливо критично для систем виявлення об'єктів у взутті. У деяких випадках виробники рекомендують встановлення детекторів на підймальних платформах або спеціальних немагнітних підставках, що забезпечують мінімальний вплив підлоги.

Кліматичні умови також мають значення. Перепади температури та вологості впливають на електронні компоненти детектора, можуть спричиняти конденсацію всередині корпусу та змінювати електричні характеристики котушок. Для вуличного застосування (контрольно-пропускні пункти, стадіони) детектори повинні відповідати ступеню захисту не нижче IP55 і бути розраховані на діапазон температур від -20°C до +50°C.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1.4 Обґрунтування доцільності електромагнітного методу виявлення

1.4.1 Порівняльний аналіз методів за ключовими критеріями

Підсумовуючи розгляд методів виявлення металевих предметів, проведемо їх структурований порівняльний аналіз за комплексом критеріїв, що мають практичне значення для застосування на об'єктах громадського користування.

Безпека для відвідувачів і персоналу є пріоритетним критерієм. Рентгенівські методи (традиційна рентгенографія та КТ) пов'язані з іонізуючим випромінюванням і, незважаючи на мінімальні дози при огляді багажу (0,01–0,1 мкЗв за сканування), накладають обмеження на застосування для особистого огляду людей через вимоги радіаційного захисту та ліцензування. Для систем персонального огляду регуляторні органи більшості країн вимагають обґрунтування необхідності та одержання спеціального дозволу. Електромагнітні детектори у використовуваних частотних діапазонах (до 100 кГц) та при типових рівнях збуджувального поля (менше 0,5 мТл) є безпечними для більшості категорій осіб, за винятком пацієнтів з активними імплантованими пристроями (кардіостимулятори), для яких передбачається альтернативна процедура огляду [5].

Пропускна здатність і час огляду є критичними для забезпечення нормального режиму роботи об'єкта. Арочний металодетектор при правильному розташуванні та підготовці відвідувачів (завчасне виймання металевих предметів) забезпечує пропускну здатність 400–900 осіб за годину на одну лінію. Рентгенографічні системи для багажу — 600–1200 одиниць за годину, однак вимагають подачі об'єктів на конвеєр. Ручний огляд займає від 30 секунд до 3–5 хвилин на одну особу залежно від ретельності. КТ-системи для персонального огляду (поки що на стадії впровадження) забезпечують від 180 до 400 осіб на годину.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Вартість придбання та експлуатації суттєво диференціює методи. Якісний аручний детектор для застосування відповідно до стандарту ЕСАС коштує від 3 000 до 30 000 євро залежно від кількості зон і функціонального оснащення. Ручні детектори — від 100 до 1 500 євро. Рентгенографічна система — від 50 000 до 300 000 євро плюс витрати на ліцензування та технічне обслуговування. КТ для огляду — від 300 000 до 2 мільйонів євро. Терагерцові системи персонального огляду (активні міліметрові хвилі) — від 100 000 до 500 000 євро. Отже, за критерієм вартісної ефективності електромагнітні детектори виграють у 10–100 разів.

Вимоги до персоналу також різняться. Рентгенівські та КТ-системи потребують персоналу, що пройшов спеціальне навчання і атестацію, регулярного медичного контролю та дозиметричного моніторингу. Електромагнітні детектори в переважній більшості країн не вимагають спеціального ліцензування персоналу, достатньо базового навчання тривалістю від кількох годин до кількох днів.

1.4.2 Переваги електромагнітного методу для об'єктів громадського користування

Аналіз застосування різних методів виявлення металевих предметів в контексті забезпечення безпеки об'єктів громадського користування показує, що електромагнітний (індукційний, вихрострумний) метод є оптимальним за сукупністю практично значущих критеріїв.

Перша ключова перевага — абсолютна радіаційна безпека. Електромагнітний детектор використовує поля наднизьких та низьких частот (від 1 до 100 кГц), що не чинять іонізуючої дії на біологічні тканини. Рівні поля в зоні проходження детектора відповідають рекомендаціям ICNIRP і є безпечними для необмеженого щоденного проходження [5]. Це принципово важливо для об'єктів з масовим відвідуванням — торгові центри, транспортні вузли, стадіони — де один і той самий відвідувач може проходити контроль кілька разів на день.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Друга перевага — висока пропускна здатність та інтеграція в архітектуру входу. Арочний детектор займає простір стандартного дверного прорізу та може бути встановлений безпосередньо в вестибюлі будівлі без суттєвої перебудови. Час проходження — 1–3 секунди. На відміну від рентгенографічних систем, не потребує зупинки та укладення предметів на конвеєр для особистого огляду, а лише виймання великих металевих предметів з кишень.

Третя перевага — прийнятна вартість масового впровадження. Обладнання одного контрольного пункту на стадіоні або торговому центрі вимагає від 5 000 до 50 000 євро — на порядки менше, ніж рентгенівські системи аналогічного призначення. Це робить масове охоплення об'єктів економічно реалістичним.

Четверта перевага — відсутність вимог до інфраструктури, крім підведення стандартного електроживлення (220 В, 50 Гц, потужність до 100 Вт). Рентгенівські системи потребують виділеного живлення, захисного екранування приміщення, засобів утилізації радіаційно забруднених елементів. Це усуває значні архітектурні та адміністративні бар'єри для впровадження.

П'ята перевага — простота технічного обслуговування. Електромагнітні детектори не мають швидкозношуваних елементів (на відміну від рентгенівських трубок, що потребують заміни після певного ресурсу), не потребують спеціального технічного персоналу для регламентного обслуговування та мають середній термін служби 10–15 років без капітального ремонту.

Важливо підкреслити, що оптимальність електромагнітного методу не означає його універсальності або відсутності обмежень. Для виявлення неметалевих загроз (пластикова зброя, вибухівка в пластиковому корпусі), для огляду багажу та вантажів ці методи не є оптимальними і доповнюються рентгенографічними засобами. Однак у сфері особистого

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

огляду відвідувачів громадських об'єктів електромагнітний метод не має рівноцінної альтернативи з точки зору поєднання безпеки, ефективності та вартості.

1.4.3 Висновки та обґрунтування вибору методу для розробки системи

Проведений у першому розділі аналіз фізичних основ взаємодії металів з різними видами фізичних полів, огляд еволюції методів виявлення від механічних щупів до комп'ютерної томографії, характеристика сучасних металодетекторів та аналіз факторів, що ускладнюють виявлення, дають підстави для наступних висновків.

Визначальними фізичними властивостями металів, що роблять їх принципово виявленими для електромагнітних методів, є висока електропровідність, що забезпечує наведення вихрових струмів, та магнітна проникність (для феромагнетиків), що спричиняє збурення зовнішнього поля. Ці властивості виражені у металів у сотні і тисячі разів сильніше, ніж у матеріалів одягу та органічних тканин, що забезпечує достатній контраст сигналу для надійного виявлення [7].

Серед розглянутих методів — механічних, акустичних, рентгенографічних, томографічних та електромагнітних — найбільш доцільним для застосування в системі безпеки об'єктів громадського користування є електромагнітний метод, заснований на аналізі вихрових струмів та збурень магнітного поля. Цей вибір обумовлений оптимальним поєднанням чотирьох базових критеріїв: радіаційна безпека (відсутність іонізуючого випромінювання), висока пропускна здатність (до 900 осіб за годину), прийнятна вартість (у 10–100 разів нижча за альтернативи порівнянного призначення) та простота інфраструктурної інтеграції.

Основними напрямками вдосконалення електромагнітних детекторів, що стимулюють розвиток нових інформаційних систем у цій галузі, є: підвищення точності локалізації металевго предмета (до рівня конкретної

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

частини тіла), вдосконалення алгоритмів дискримінації типів металів для зниження числа хибних тривог, посилення завадостійкості в умовах насиченого електромагнітного середовища сучасних будівель, а також інтеграція з відеосистемами та системами управління доступом для побудови комплексних рішень безпеки [1, 2, 4].

Саме розробці інформаційної системи виявлення металевих предметів на основі електромагнітного методу, що відповідає сучасним вимогам до систем безпеки громадських об'єктів, присвячена дана бакалаврська кваліфікаційна робота. Практична реалізація системи, архітектура її апаратного та програмного забезпечення, алгоритми обробки сигналів та оцінка ефективності розглядаються у наступних розділах.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2 РОЗРОБКА АРОЧНОГО МЕТАЛОДЕТЕКТОРА

2.1 Принцип виявлення металевого предмета на фоні навколишнього середовища

2.1.1 Електромагнітне поле як засіб зондування речовини

Електромагнітне поле взаємодіє з речовиною через два фундаментально різних механізми, що визначаються електричними і магнітними властивостями матеріалу. Електрична складова поля діє на вільні та зв'язані заряди. Магнітна складова — на магнітні моменти атомів і на рухомі заряди. Обидва механізми відбуваються одночасно і нерозривно пов'язані рівняннями Максвелла, проте їх відносний внесок у взаємодію залежить від властивостей конкретного матеріалу та частоти поля [7].

У матеріалах з упорядкованою доменною структурою — феромагнетиках — магнітна складова поля впливає на орієнтацію магнітних доменів. Домен є областю, у межах якої магнітні моменти атомів спонтанно вирівняні в одному напрямку внаслідок обмінної взаємодії. У відсутності зовнішнього поля домени орієнтовані хаотично, і результуючий магнітний момент зразка близький до нуля. При накладенні зовнішнього магнітного поля границі між доменами (блохівські стінки) починають переміщуватися: домени, орієнтовані вздовж поля, ростуть за рахунок сусідніх. Макроскопічний результат — намагнічування матеріалу, тобто поява результуючого магнітного моменту, що утворює суперпозицію із зовнішнім полем і змінює його просторовий розподіл [7]. Зовнішнє поле поблизу феромагнетика вже не таке, яким було б без нього: воно деформоване, ущільнене у матеріалі (де $\mu_r \gg 1$) і послаблене у прилеглому просторі за рахунок притягання силових ліній усередину предмета.

У провідних матеріалах — як феромагнітних, так і немагнітних — електрична складова змінного поля примушує вільні електрони рухатися.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		29

Цей рух є електричним струмом. Оскільки поле є змінним у часі, струм також є змінним і за напрямком, і за величиною. Рухомі заряди, у свою чергу, є джерелом власного електромагнітного поля — вторинного поля відносно поля збудника. Вторинне поле є змінним з тією самою частотою, що і первинне, але зсунутим по фазі: активна частина зсуву пов'язана з активними втратами в провіднику (джоулів нагрів), реактивна — з індуктивністю контуру вихрових струмів. Таким чином, провідний предмет у змінному полі стає вторинним джерелом електромагнітного поля, просторовий розподіл і фазовий зсув якого несуть інформацію про електричні властивості матеріалу (рис.2.1).

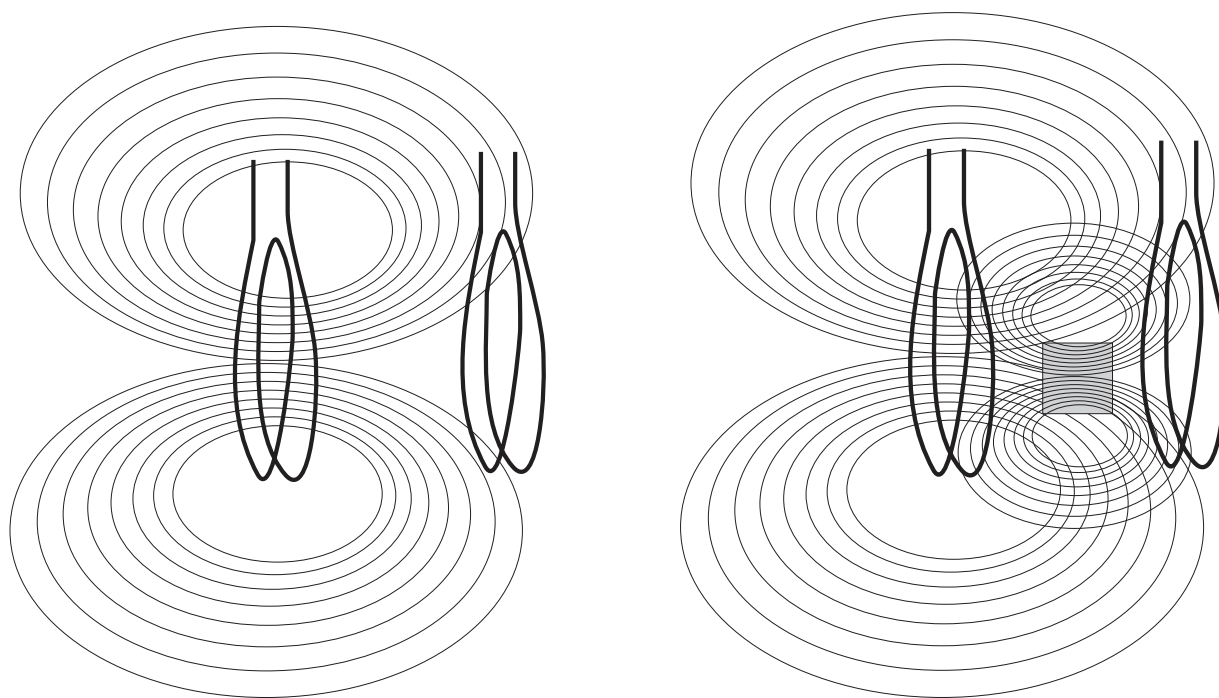


Рисунок 2.1 – Зміна структури магнітного поля при внесенні в магнітне поле феромагнітного тіла

Обидва механізми — доменне перемагнічування і рух вільних зарядів — не існують незалежно. Рухомі заряди утворюють струм, струм породжує магнітне поле, магнітне поле впливає на домени. Домени, перемагнічуючись, змінюють магнітну проникність середовища, що впливає на розподіл поля і, відповідно, на характер руху зарядів. Для

феромагнітних провідників (будь-яка конструкційна сталь) обидва механізми діють одночасно і взаємно підсилюють відгук матеріалу на зовнішнє поле. Немагнітні провідники (алюміній, мідь, латунь) взаємодіють лише через механізм вільних зарядів. Діелектрики без вільних зарядів і без доменної структури (повітря, тканина, пластик) взаємодіють з полем лише через поляризацію зв'язаних зарядів і орієнтаційну поляризацію молекул, що дає на порядки менший ефект у діапазоні частот, що застосовуються в металодетекторах [6].

2.1.2 Вибір типу магнітного поля

Постійне магнітне поле намагнічує феромагнетик і притягує до себе силові лінії, змінюючи просторовий розподіл поля. Проте постійне поле не породжує у провідному матеріалі руху зарядів: за законом Фарадея ЕРС індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку. При $d\Phi/dt = 0$ ЕРС дорівнює нулю, струму немає, вторинного поля немає. Отже, постійне поле не може бути використане для зондування провідних немагнітних предметів. Для виявлення будь-якого металу необхідне змінне поле.

Змінне поле, поширюючись у просторі, пронизує можливо присутній металевий предмет (рис.2.2). Ненульова похідна dB/dt наводить у провіднику ЕРС, що спричиняє вихрові струми. Їх просторовий розподіл визначається геометрією предмета і глибиною скін-шару $\delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu}$. При збільшенні частоти скін-шар зменшується, струми концентруються ближче до поверхні, і ефективна площа взаємодії зменшується. При зменшенні частоти струми проникають глибше і охоплюють більший об'єм. Вибір робочої частоти детектора — це компроміс між глибиною проникнення в предмет і чутливістю до малих об'єктів.

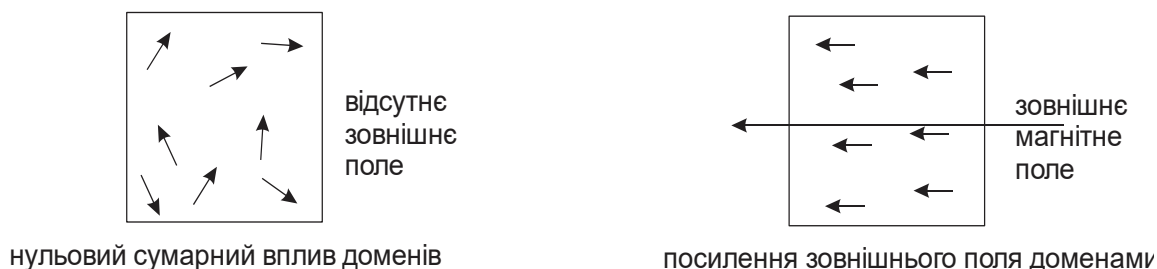


Рисунок 2.2 – Явище посилення зовнішнього поля громіздкими доменами феромагнетиків

Вихрові струми є джерелом вторинного електромагнітного поля (рис.2.3). Це поле у просторі поза предметом є суперпозицією з первинним полем збудника. Приймальна котушка детектора реєструє саме цю суперпозицію. У відсутності металевого предмета сигнал на приймачі визначається прямим зв'язком з передавачем і навантаженням від нерухомих провідних елементів навколишнього середовища (арматура, металеві конструкції) — це фоновий стан. При появі металевого предмета суперпозиція змінюється: з'являється додаткова складова вторинного поля від вихрових струмів у предметі. Ця зміна — відхилення від фонового стану — і є сигналом виявлення.

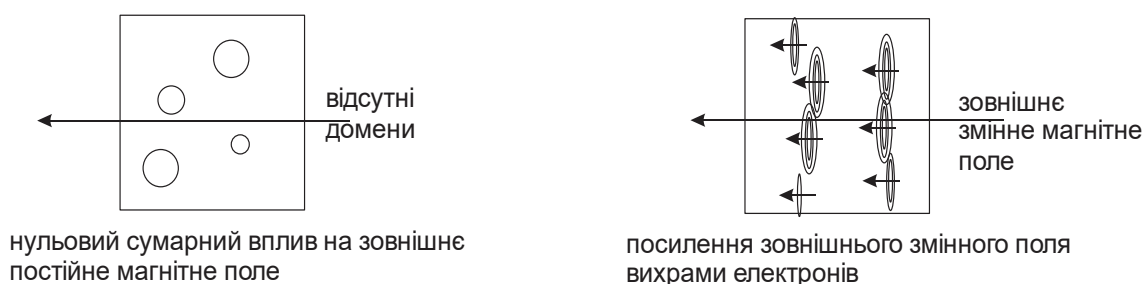


Рисунок 2.3 – Вплив провідного парамагнітного матеріалу на постійне і змінне магнітне поле

Принципово важливо, що фоновий стан не є нульовим і значно перевищує за рівнем корисний сигнал від предмета. Завдання системи обробки сигналу — виокремити малу змінну складову на тлі великого стаціонарного фону. Для цього застосовуються диференційні схеми

включення котушок, синхронне детектування на частоті збудника, фазова селекція між активною і реактивною складовими сигналу, а також часова обробка з відніманням фоновому рівня. Будь-яка зміна фоновому стану, не пов'язана з металевим предметом (зміна температури, вібрація конструкції, сусідні електромагнітні джерела), є завадою і знижує відношення сигнал/завада.

2.1.3 Імпеданс середовища і задача його спостереження

З погляду джерела змінного поля навколишній простір разом з усіма об'єктами в ньому являє собою навантаження з комплексним опором — імпедансом. Активна складова цього імпедансу відповідає поглинанню енергії (вихрострумові і гістерезисні втрати), реактивна — індуктивному зв'язку з навколишніми об'єктами. Джерело реагує лише на загальний імпеданс навантаження і не може безпосередньо розрізнити, яким конкретним об'єктом він визначається. Для однопортової системи (де джерело і приймач суміщені) весь простір — це одне нерозрізняване навантаження.

Поява металевому предмета в зоні дії детектора змінює імпеданс: активна складова зростає через додаткові втрати, реактивна зменшується через ефект магнітного екранування. Відносна зміна імпедансу тим більша, чим більша частка загальних втрат у середовищі припадає на предмет. Якщо предмет малий порівняно із зоною дії детектора, зміна імпедансу мала і важко відрізнити її від флуктуацій фоновому навантаження. Це фундаментальне обмеження будь-якого методу зондування — необхідність відрізнити корисну зміну від шуму і завад.

Для виокремлення корисної зміни імпедансу необхідно організувати у системі або у середовищі керовану змінну, яка забезпечує контрольовану різницю між двома станами. Порівнюючи стани «з металом» і «без металу» або «метал у позиції А» і «метал у позиції В», система отримує різницевий сигнал, що прямо пов'язаний з властивостями предмета. Саме ця ідея

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

лежить в основі всіх практичних реалізацій: будь-яка схема виявлення металу — це схема порівняння двох станів середовища, де один стан є опорним, а інший — поточним.

2.1.4 Узагальнення принципів формування інформативної зміни

Усі практично реалізовані методи виявлення металевих предметів зводяться до організації керованої зміни просторових відносин між елементами системи зондування і середовищем. Можливі дві узагальнені стратегії.

Перша стратегія — переміщення випромінювача або приймача відносно нерухомого середовища(рис.2.4). При переміщенні котушки змінюється просторовий зв'язок між нею і предметом, а отже — імпеданс, що реєструється системою. У пошукових металодетекторах оператор переміщує котушку над поверхнею. В аروحному металодетекторі функцію переміщення виконує людина, що проходить крізь нерухому систему котушок: рух людини є еквівалентом відносного переміщення можливого металевго об'єкта відносно детектора. Система аналізує зміну сигналу у часі при проходженні і на підставі характеру цієї зміни приймає рішення. Просторова роздільність при цьому забезпечується або розміром котушки (локальна зона чутливості), або застосуванням кількох котушкових пар на різних висотах, що перекривають різні зони перерізу проходу.

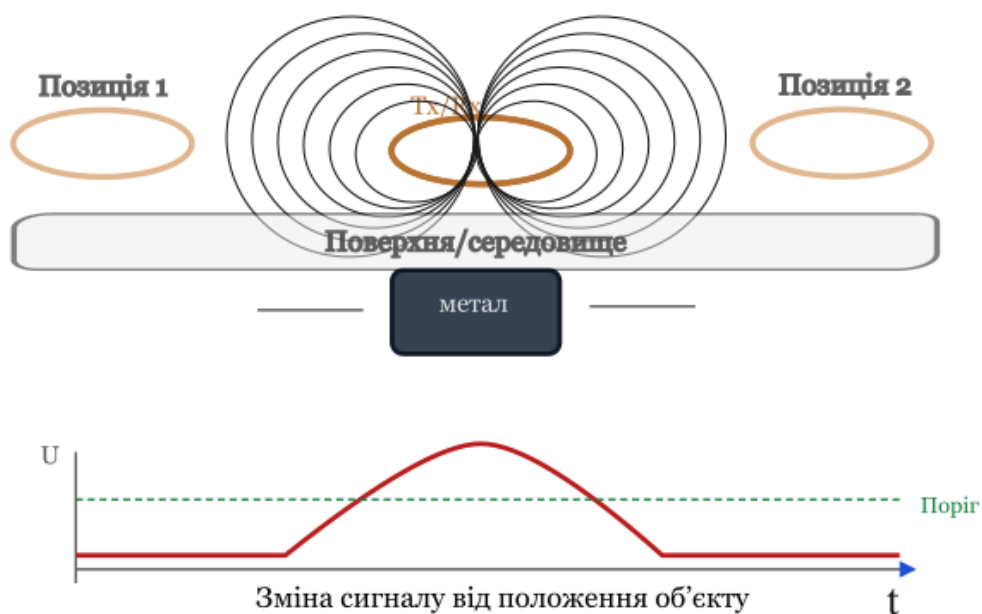


Рисунок 2.4 – Виявлення неоднорідності сприйняття змінного магнітного поля при русі випромінювача в нерухомому середовищі

Друга стратегія — переміщення фрагменту середовища відносно нерухомого сенсора (рис.2.5). Якщо сенсор нерухомий, а середовище у певному фрагменті просторово змінюється — наприклад, металевий предмет переміщується разом з людиною крізь зону чутливості нерухомого сенсора — ефект для сенсора тотожний першій стратегії: змінюється просторовий зв'язок між ним і предметом. На рівні вимірюваного сигналу обидві стратегії дають один і той самий результат — зміну імпедансу в часі. Різниця — лише в тому, яка частина системи є рухомою: елемент системи або елемент середовища.

Просторова роздільність без фізичного переміщення досягається електронним мультиплексуванням. Кілька пар котушок, рознесених у просторі, по черзі або одночасно зондують різні ділянки зони контролю. Порівнюючи сигнали з різних пар, система визначає не лише факт наявності металу, а й його просторове положення у зоні контролю. Цей принцип реалізований у багатозонних аروحних детекторах: незалежні зони по висоті дозволяють локалізувати металевий предмет у певній ділянці тіла людини

без будь-якого механічного руху елементів детектора. Додаткову інформацію про характеристики виявленого об'єкта дає зондування на кількох частотах: різна глибина скін-шару і різна відносна роль магнітних і провідних властивостей матеріалу на різних частотах дозволяють отримати частотний «відбиток» предмета і частково визначити його матеріал.

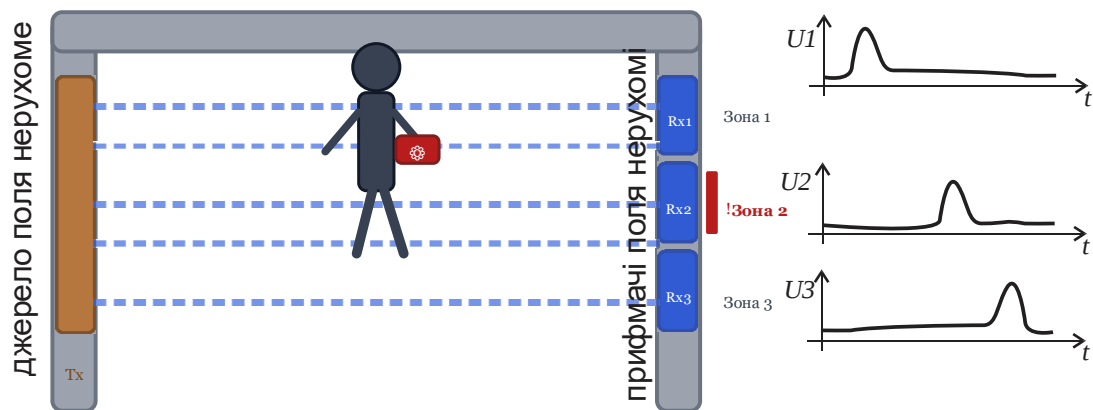


Рисунок 2.5 – Рух предмету вздовж лінійки приймальних котушок спричиняє в них по чергову зміну прийнятого сигналу

Окремим випадком, що не вписується в жодну з двох наведених стратегій у чистому вигляді, є метод виявлення за нелінійністю магнітної проникності феромагнетика. Сильне збуджувальне поле переводить феромагнетик у нелінійний режим, при якому у відгуку з'являються гармоніки, відсутні у лінійному середовищі. Приймач налаштований на другу або третю гармоніку збудника. У лінійному навколишньому середовищі (повітря, діелектрики, немагнітні метали) ці гармоніки практично відсутні, тому фоновий сигнал на частоті гармоніки близький до нуля. При появі феромагнітного предмета гармоніки виникають, і приймач реєструє сигнал. Цей метод має надзвичайно низький фоновий рівень і застосовується для виявлення дрібних феромагнітних предметів у ситуаціях, де стандартний вихрострумний метод дає недостатнє відношення сигнал/фон.

2.2 Розробка структурної схеми стаціонарного арочного металодетектора

Структурна схема пристрою визначає склад функціональних блоків та зв'язки між ними, необхідні для реалізації принципу виявлення, описаного в підрозділі 2.1. Оскільки розроблюваний пристрій призначений для стаціонарного використання на об'єктах громадського користування, його конструкція виконана у вигляді арки, через яку проходить людина. Рухомим елементом системи є не сам детектор, а фрагмент середовища — тіло людини разом із можливими металевими предметами. Ця концепція накладає вимогу на структурну схему: всі сенсорні елементи нерухомі, а виявлення ґрунтується на реєстрації зміни імпедансу середовища під час проходження людини крізь зону контролю.

Основним засобом зондування є змінне електромагнітне поле. Вибір змінного поля, а не постійного, зумовлений необхідністю виявляти як феромагнітні, так і немагнітні провідні метали. Постійне магнітне поле дозволяє лише виявити феромагнітний предмет за зміною механічної взаємодії або за допомогою датчика Холла, однак такі засоби є дорогими, чутливими до зовнішніх механічних впливів і не реєструють кольорові метали. Змінне поле, навпаки, створює вихрові струми в будь-якому провіднику, а також взаємодіє з магнітними доменами феромагнетиків. Крім того, вимірювальні засоби для змінного поля — підсилювачі змінного струму, синхронні детектори — є дешевшими і простішими у реалізації порівняно з приладами для прецизійного вимірювання постійного магнітного поля. Тому структурна схема базується на генераторі змінної частоти, випромінювальній котушці та приймальній котушці.

Стаціонарний арочний металодетектор складається з таких основних функціональних блоків(рис.2.6): генератор змінної напруги, випромінювальна котушка, приймальна котушка, підсилювач сигналу,

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

синхронний детектор, аналого-цифровий перетворювач, мікроконтролер, блок індикації, блок керування оператора та джерело живлення. Додатково можуть бути присутні блоки температурної компенсації та фільтрації завад. Усі блоки з'єднані між собою електричними зв'язками, що передають аналогові або цифрові сигнали.

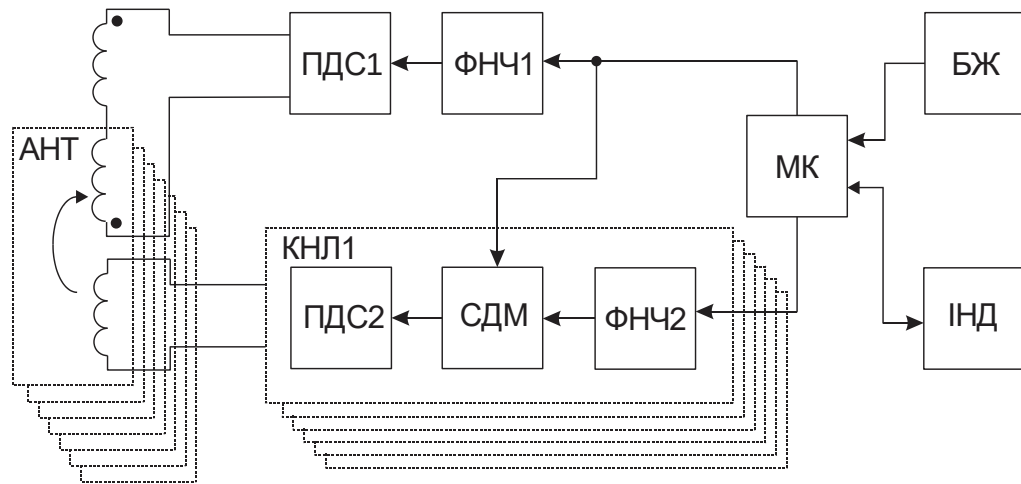


Рисунок 2.6 – Структурна схема металодетектора

Генератор змінної напруги створює синусоїдальний сигнал певної частоти. Вибір частоти визначається компромісом між чутливістю до дрібних предметів і глибиною проникнення поля. Типовий діапазон для аروحних металодетекторів становить від 1 до 100 кілогерц. Генератор має забезпечувати стабільність амплітуди та частоти, оскільки будь-які дрейфи будуть сприйматися системою як зміна імпедансу середовища [12]. Сигнал із генератора подається на випромінювальну котушку і одночасно на синхронний детектор як опорна напруга. Така архітектура дозволяє виділити корисний сигнал на тлі шумів методом синхронного детектування [8].

Таким чином, структурна схема стаціонарного аروحного металодетектора включає генератор, випромінювальну котушку, приймальну котушку або систему котушок, підсилювач, синхронний детектор, АЦП, мікроконтролер, блок індикації, блок керування та джерело

живлення. Усі блоки з'єднані в єдину систему, яка реалізує вимірювання зміни імпедансу середовища під час руху людини крізь арку та приймає рішення про наявність металевого предмета.

2.3 Розробка принципів схем вузлів стаціонарного арочного металодетектора

Принцип виявлення, викладений у підрозділі 2.1, ґрунтується на реєстрації малої зміни імпедансу середовища на тлі значного стаціонарного фону. У підрозділі 2.2 було обґрунтовано структурну схему, згідно з якою рухомим елементом є людина з металевими предметами, а сенсорна частина залишається нерухомою. Для перетворення слабкого відгуку металевого предмета у сигнал, придатний для подальшої цифрової обробки, необхідно застосувати дві взаємодоповнюючі математичні операції над сигналом – інтегрування та диференціювання. Інтегрування дозволяє накопичувати енергію корисного сигналу в часі, оскільки інтегратор за своєю частотною характеристикою є фільтром нижніх частот. Це пригнічує високочастотні завади, які можуть надходити від сусідніх електромагнітних джерел, та зменшує вплив випадкових шумів. Диференціювання, навпаки, виділяє швидкі зміни сигналу, що виникають при русі металевого предмета відносно нерухомих котушок. Оскільки людина проходить крізь арку з певною швидкістю, магнітний потік крізь приймальну котушку змінюється в часі, і згідно із законом Фарадея електрорушійна сила пропорційна похідній магнітного потоку. Диференціатор пригнічує повільні дрейфи, зумовлені зміною температури або стаціонарними металевими конструкціями, і пропускає лише динамічну складову, пов'язану з рухом предмета [12]. Поєднання інтегратора та диференціатора в аналоговому тракті дозволяє перетворити слабкий відгук металевого предмета на стійкий до фону сигнал, амплітуда якого корелює з масою, розміром та електропровідними властивостями об'єкта, а також зі швидкістю його руху.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У стаціонарній аروحній системі швидкість проходження людини вважається обмеженою діапазоном нормальної ходи, тому варіації швидкості вносять лише незначну похибку, яка компенсується цифровою обробкою.

Схемотехнічна реалізація металодетектора базується на принципі індукційного балансу в діапазоні дуже низьких частот. Цей принцип передбачає просторове рознесення котушок таким чином, що у відсутності металевих предметів результуючий сигнал на приймальній системі прямує до нуля. Сенсорна частина містить три типи котушок. Генераторна котушка, яку також називають котушкою збудження, створює первинне змінне магнітне поле синусоїдальної форми частотою 8,5 кГц. Приймальна котушка призначена для реєстрації сумарного поля, що є суперпозицією первинного поля та вторинних полів, створених вихровими струмами або намагніченням металевих предметів. Компенсаційна котушка вмикається послідовно з генераторною, але у протифазі, і розташовується таким чином, щоб індукована в ній електрорушійна сила від прямого поля генератора була рівною за амплітудою, але протилежною за знаком до електрорушійної сили приймальної котушки. У статичному стані, за відсутності металевих об'єктів поблизу датчика, векторна сума електрорушійних сил приймальної та компенсаційної котушок прямує до нуля. Таке балансування дозволяє компенсувати потужний сигнал збудження, який інакше наситив би вхідні підсилювачі, забезпечуючи високу чутливість системи до малих збурень магнітного поля. При наближенні металевого предмета до зони чутливості первинне електромагнітне поле наводить у поверхневому шарі металу вихрові струми, які згідно з правилом Ленца створюють власне вторинне магнітне поле, що протидіє первинному. Це вторинне поле наводиться на приймальну систему, порушуючи встановлений баланс. В результаті на виході датчика з'являється сигнал розбалансу – змінна напруга, амплітуда та фаза якої залежать від провідності, магнітної проникності, розмірів та

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

форми об'єкта. Саме цей залишковий сигнал подається на вхід аналогового тракту(рис.2.7).

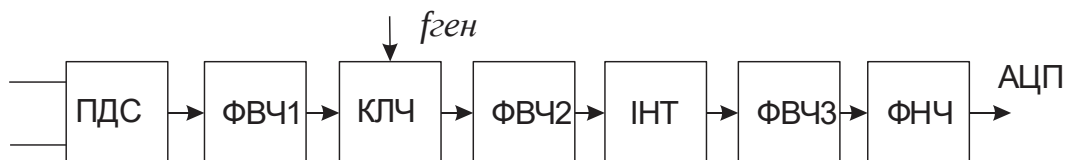


Рисунок 2.7 – Структурна схема аналогового тракту одного каналу металодетектора

Аналоговий тракт побудований за каскадною структурою, що включає вхідний підсилювач, синхронний детектор, інтегратор, фільтр руху (який виконує функцію диференціатора), підсилювач каналу руху та вихідний буферний каскад. Кожен каскад виконує окрему функцію перетворення сигналу, і всі вони узгоджені між собою за вхідними та вихідними імпедансами, а також за смугою пропускання.

Вхідний підсилювач реалізований на двох послідовних інвертуючих каскадах з операційними підсилювачами типу TL082 (рис.2.8).

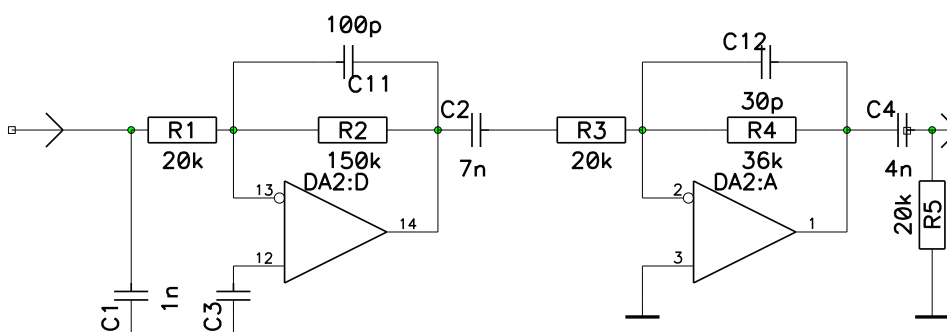


Рисунок 2.8 – Схема вхідного підсилювача (ПДС)

Цей тип підсилювача обрано через наявність польових транзисторів на вході, що забезпечує високий вхідний опір та низький рівень власних шумів. Перший каскад виконаний на одному з операційних підсилювачів у корпусі TL082, його коефіцієнт підсилення визначається відношенням резистора зворотного зв'язку 150 кОм до вхідного резистора 20 кОм і становить -7,5. Другий каскад реалізований на іншому операційному

підсилювачі того самого корпусу, його коефіцієнт підсилення дорівнює -2, оскільки резистор зворотного зв'язку становить 36 кОм, а вхідний резистор – 20 кОм. Загальне підсилення вхідного каскаду дорівнює 15. Між першим та другим каскадами встановлено розділовий конденсатор, який відокремлює каскади за постійним струмом. Це усуває вплив дрейфу нуля та постійної складової вхідного сигналу, запобігаючи насиченню підсилювачів. У кола зворотного зв'язку кожного каскаду введено конденсатори, які обмежують смугу пропускання зверху, що запобігає самозбудженню на високих частотах і зменшує рівень високочастотних завад, які можуть потрапити на вхід.

Після вхідного підсилення сигнал надходить на синхронний детектор. Цей вузол призначений для виділення амплітуди та фази сигналу на частоті збудника 8,5 кГц. Синхронний детектор побудований на аналоговому комутаторі типу 4066, який являє собою зчетверений КМОН-ключ (рис.2.9).

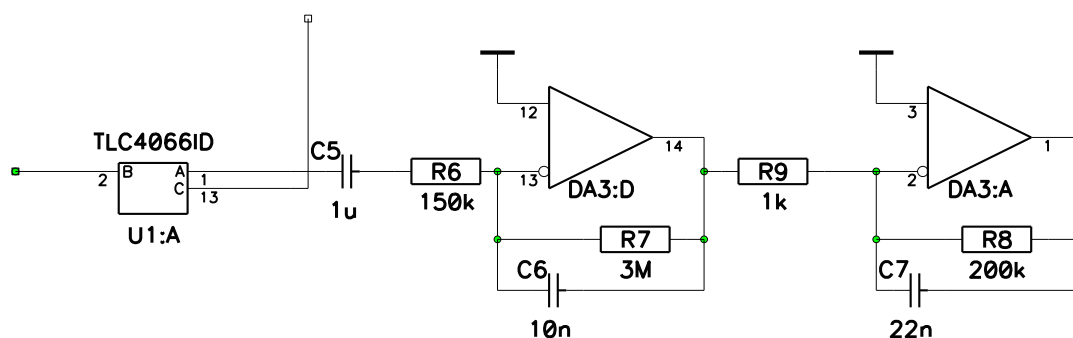


Рисунок 2.9 – Схема синхронного детектора із інтегратором

У даній схемі використовується один ключ, який тактується опорним сигналом прямокутної форми з частотою 8,5 кГц. Опорний сигнал формується мікроконтролером на окремому виводі і є синхронізованим зі струмом збудження генераторної котушки. Така синхронізація забезпечує детектування саме тієї частоти, яка випромінюється, і відкидає сигнали на інших частотах. Ключ працює наступним чином: у замкнутому стані він пропускає вхідний сигнал на вихід, у розімкнутому – блокує його. Оскільки операційні підсилювачі попереднього каскаду живляться від двополярної

напруги $\pm 7,5$ В, вхідний сигнал має як додатні, так і від’ємні напівхвилі. Для коректної роботи ключа необхідно забезпечити керуючий сигнал, який перемикається в діапазоні між мінімальною та максимальною напругою живлення ключа.

Мікросхема 4066 може комутувати аналогові сигнали в межах своєї напруги живлення. У схемі напруга живлення ключа подана як $+7,5$ В на позитивний вивід, а спільний вивід ключа підключено до $-7,5$ В. Логічні рівні 0 та 3,3 В, які формує мікроконтролер, не відповідають цьому діапазону. Тому застосовано схему узгодження рівнів(рис.2.10), побудовану на дискретних транзисторах, яка перетворює вхідний сигнал SYNC з амплітудою 3,3 В у двополярний сигнал, що коливається між $-7,5$ В та $+7,5$ В.

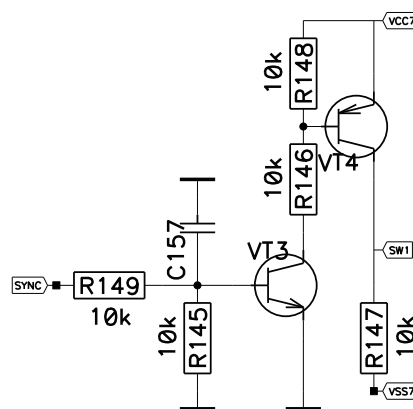


Рисунок 2.10 – Схема узгодження рівнів

Цей сигнал подається на керуючий вивід ключа. На виході ключа встановлено розділовий конденсатор ємністю 1 мкФ. Цей конденсатор виконує дві функції. По-перше, він відсікає постійну складову пульсуючого однополярного сигналу, який з’являється на виході ключа. По-друге, спільно з вхідним опором наступного каскаду він утворює фільтр верхніх частот, який пропускає лише змінну складову. Завдяки такому схемотехнічному рішенню реалізуються коефіцієнти передачі синхронного детектора $+0,5$ та $-0,5$, що відповідає математичній операції перемноження вхідного сигналу на опорний меандр [9].

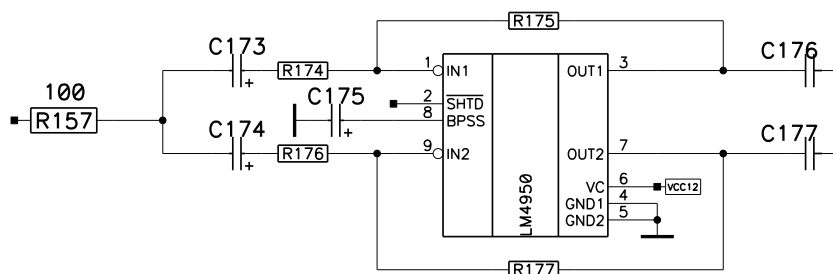
Демодульований сигнал після синхронного детектора містить корисну інформацію про металевий предмет, але також містить залишки опорної частоти та високочастотні завади. Для їх пригнічення та для накопичення енергії сигналу застосовується блок інтеграторів. Інтегратор виконаний на двох послідовно з'єднаних операційних підсилювачах типу TL082.

Двокаскадний інтегратор на базі операційних підсилювачів TL082 накопичує енергію корисного сигналу та дозволяє виявити навіть мінімальні зміни від металевих предметів. Його перший каскад має постійну часу 3,3 мс, а другий — 6,6 мс, що забезпечує високу чутливість системи. Після інтегрування сигнал проходить крізь фільтр руху, який працює як диференціатор із частотою зрізу 1,6 Гц. Цей вузол повністю блокує постійну напругу від фонових конструкцій та пропускає лише динамічні коливання, що виникають під час руху людини крізь арку з типовою частотою від 1 до 3 Гц. Далі динамічний сигнал підсилюється у два рази та зміщується на опорну напругу 1,7 В за допомогою спеціального підсилювача. Таке зміщення необхідне, оскільки вхід мікроконтролера сприймає лише однополярну напругу від 0 до 3,3 В, а сигнал від металу може мати як позитивні, так і негативні відхилення.

Завершує аналоговий тракт вихідний буферний каскад, який захищає вхід мікроконтролера від перенапруги та виконує попередню фільтрацію шумів перед процесом оцифрування. Для створення магнітного поля мікроконтролер STM32G431 генерує прямокутні імпульси на частоті 8,5 кГц.

Оскільки такий сигнал містить багато зайвих гармонік, він пропускається крізь активний фільтр низьких частот четвертого порядку (рис.2.12). Це дозволяє отримати чисту синусоїдальну напругу, яка після підсилення подається на випромінювальну котушку метало-

Коефіцієнт підсилення кожної секції фільтра підтримується близьким до одиниці, що мінімізує вплив власних шумів операційних підсилювачів. Після проходження через фільтр прямокутний сигнал перетворюється на синусоїдальний з коефіцієнтом гармонік менше одного відсотка. Очищений синусоїдальний сигнал подається на вхід підсилювача потужності LM4950. Ця мікросхема являє собою двоканальний аудіопідсилювач, виконаний за мостовою схемою включення навантаження. Мостова топологія дозволяє подвоїти амплітуду вихідної напруги порівняно з однотактною схемою при тій самій напрузі живлення, що забезпечує формування електромагнітного поля достатньої інтенсивності(рис.2.13) . Мікросхема LM4950 має два незалежних канали, що дозволяє живити ліву та праву випромінювальні котушки арки окремо.



Індуктивність кожної котушки становить 500 мкГн, активний опір – декілька Ом. Живлення підсилювача потужності подається безпосередньо

від вхідної напруги 12 В без додаткової стабілізації, оскільки вихідна потужність пропорційна квадрату напруги живлення.

Система приймальних котушок складається з шести незалежних зон по висоті арки. Кожна зона містить приймальну котушку, намотану на компактному каркасі 350 витками тонкого дроту. Індуктивність приймальної котушки становить 33 мГн, що забезпечує достатній рівень наведеної електрорушійної сили від слабких змін магнітного поля. Крім приймальної котушки, кожна зона має індивідуальну компенсаційну котушку. Компенсаційні котушки підключені послідовно з генераторною котушкою, але з протилежною полярністю відносно приймальних котушок. Кількість витків компенсаційної котушки визначається положенням приймальної котушки відносно контуру збудження. Крайні приймальні котушки, розташовані на верхньому та нижньому краях зони детектування, знаходяться у зоні максимальної напруженості поля котушки збудження, тому їх компенсаційні котушки містять три витки. Центральні приймальні котушки розміщені у зоні меншої напруженості поля, що дозволяє використовувати компенсаційні котушки з двома витками. Така градація забезпечує оптимальне балансування для кожної зони детектування. Принципова особливість конструкції компенсаційних котушок полягає у частковому відхиленні траєкторії витків від контуру приймальної котушки приблизно на одну третину довжини. Така асиметрична конфігурація створює просторово неоднорідний розподіл компенсувального поля, що дозволяє мінімізувати сумарну електрорушійну силу на клемі приймальної котушки при збереженні чутливості до локальних збурень від металевих об'єктів. Налаштування компенсації виконується під час виготовлення шляхом емпіричного підбору траєкторії витків до досягнення мінімального залишкового сигналу.

Система живлення забезпечує роздільні стабілізовані напруги для різних функціональних блоків [11]. Вхідна напруга 12 В постійного струму

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

подається від мережевого адаптера або від акумуляторної батареї. Цифрова частина, що включає мікроконтролер та логічні елементи керування, живиться напругою 3,3 В, яка формується за допомогою імпульсного знижувального перетворювача MP1584. Використання імпульсного перетворювача замість лінійного стабілізатора дозволяє уникнути значних втрат потужності, оскільки різниця між вхідною напругою 12 В та вихідною 3,3 В при струмі споживання до 1 А призвела б до розсіювання близько 9 Вт тепла. Модуль MP1584 забезпечує частоту комутації близько 1,5 МГц, що дозволяє використовувати компактні фільтрувальні елементи. Аналоговий тракт, що включає операційні підсилювачі TL082 та синхронний детектор, потребує двополярного живлення для обробки сигналів змінної полярності. Позитивна шина +7,5 В формується за допомогою лінійного стабілізатора LM317. Вибір лінійного стабілізатора обумовлений вимогами до низького рівня шумів та відсутності високочастотних пульсацій, характерних для імпульсних перетворювачів. Негативна шина -7,5 В отримана шляхом інверсного включення другого модуля MP1584. В інверсній топології загальний вивід перетворювача підключається до позитивної шини +7,5 В, а вихідна напруга знімається відносно загальної шини схеми. Це дозволяє отримати від'ємну напругу без використання спеціалізованих інверторів. Периферійні пристрої – адресовані світлодіодні індикатори WS2812 та інфрачервоні оптичні сенсори – живляться від окремої шини 5 В, яка формується третім модулем MP1584. Окремий канал живлення для периферії необхідний для ізоляції імпульсних струмів, споживаних світлодіодами, від чутливих аналогових кіл. Вихідний підсилювач потужності LM4950 живиться безпосередньо від вхідної напруги 12 В, оскільки він має широкий діапазон допустимих напруг живлення. Система безперебійного живлення містить акумуляторну батарею конфігурації 3S4P, зарядний пристрій на LM317 зі струмом заряду 1 А та схему автоматичного перемикання на діодах Шотткі.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Управління всіма вузлами здійснюється мікроконтролером STM32G431RET6. Цей мікроконтролер базується на ядрі Cortex-M4 з робочою частотою до 84 МГц та має апаратний модуль обчислень з плаваючою комою. Мікроконтролер виконує наступні функції. На виводі PA9 він генерує сигнал збудження частотою 8,5 кГц з регульованою шпаруватістю. Сигнал формується за допомогою таймера TIM1, який працює в режимі широтно-імпульсної модуляції. На виводі PA8 формується опорний сигнал синхронного детектора зі шпаруватістю 50%, що забезпечує стабільне вікно детектування. Обидва сигнали синхронізовані від одного базового лічильника таймера, що виключає дрейф фази. Мікроконтролер опитує 12 аналогових входів, до яких підключені виходи аналогового тракту від шести зон детектування. Аналогові входи розподілені наступним чином: порти PA0–PA7 для каналів 1–8, порти PC0–PC3 для каналів 9–12. Оцифрування виконується 12-бітним АЦП з використанням контролера прямого доступу до пам'яті, що дозволяє накопичувати дані без зупинки основного обчислювального циклу. Для керування світлодіодними стрічками WS2812 задіяні виводи PB10, PB11 та PB12. Кожна стрічка містить адресовані світлодіоди, які дозволяють відображати рівень сигналу по кожній зоні у вигляді кольорової шкали. Оптичні сенсори проходку підключені до виводів PB5–PB8. Звуковий сповіщувач керується через транзисторний ключ від виводу PB0. Інтерфейс UART на виводах PC10 та PC11 призначений для зв'язку із зовнішніми пристроями, зокрема для передачі статистики та діагностичної інформації.

Регулювання чутливості металодетектора реалізовано шляхом зміни амплітуди першої гармоніки сигналу збудження. Мікроконтролер змінює коефіцієнт заповнення ШІМ-сигналу на виводі PA9 у діапазоні від 16,7% до 50%. Амплітуда першої гармоніки прямокутного сигналу визначається формулою $A_1 = (4 \cdot U_{\max} / \pi) \cdot \sin(\pi \cdot D)$, де D – коефіцієнт заповнення. При $D=0,5$ $\sin(\pi \cdot 0,5)=1$, тому амплітуда максимальна. При зменшенні D

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

амплітуда зменшується за законом синуса. Для забезпечення ергономічного керування використовується логарифмічна шкала з шістьма рівнями чутливості. Рівень 6 (максимальна чутливість) відповідає $D=0,5$, рівень 1 (мінімальна чутливість) – $D=0,167$. Проміжні значення розраховані за експоненційною моделлю спаду. Такий метод регулювання впливає безпосередньо на енергію магнітного поля, що дозволяє оптимізувати відношення сигнал/шум у приймальному тракті та адаптувати систему до різних умов електромагнітної обстановки. На відміну від простої зміни цифрового порога спрацювання, регулювання амплітуди поля зменшує також рівень завад, які наводяться від зовнішніх джерел, оскільки вони не масштабуються разом з корисним сигналом.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ АРОЧНОГО МЕТАЛОДЕТЕКТОРА

3.1 Загальний алгоритм функціонування системи

Система побудована як скінченний автомат, який постійно аналізує стан оптичних сенсорів (вхідний Д1 та вихідний Д2) та сигнали з дванадцяти каналів виявлення металу. Мікроконтролер STM32G431 виконує паралельні задачі: генерація двох змінних магнітних полів частотою 8,0 кГц та 8,5 кГц, опитування АЦП, обробка переривань від сенсорів, керування індикацією та звуком, а також обмін даними з ESP01 [10]. Головний цикл програми реалізує логіку автомата, яка враховує всі можливі сценарії поведінки людини (рис.3.1).

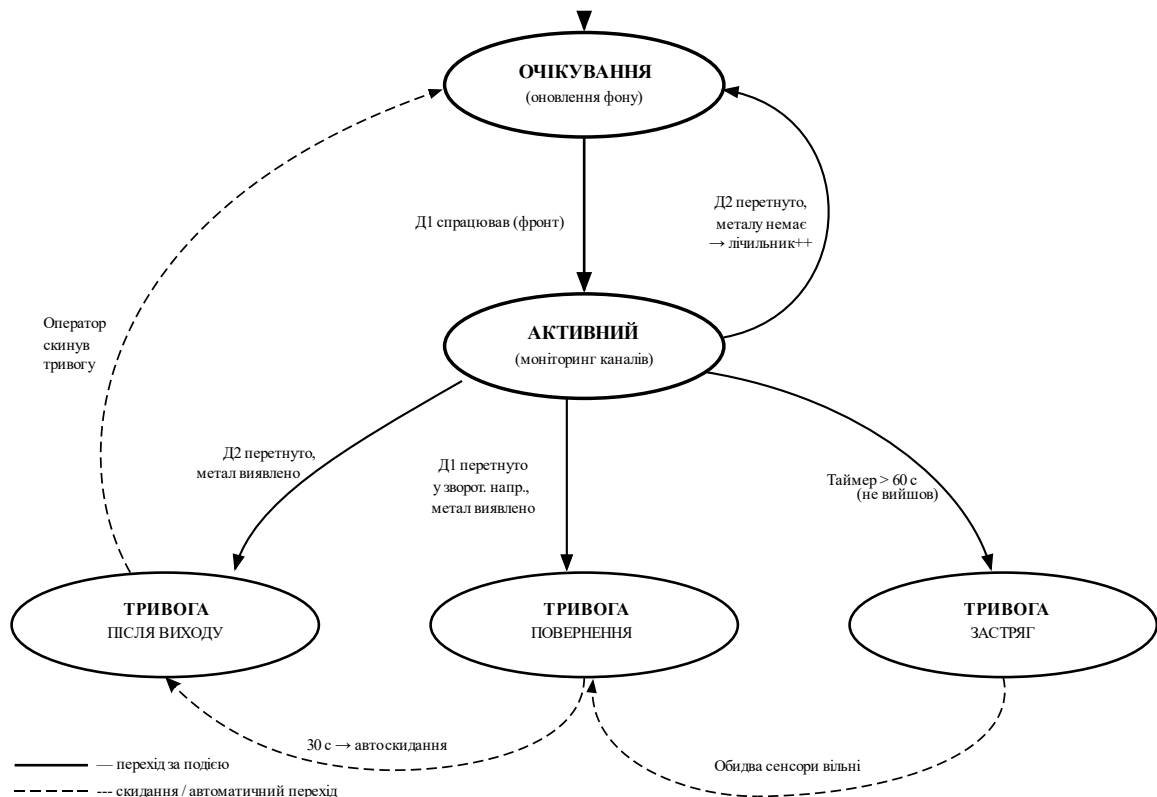


Рисунок 3.1 – Діаграма станів скінченного автомата металодетектора

Початковий стан системи – ОЧІКУВАННЯ. У цьому стані арка порожня, обидва оптичні сенсори показують відсутність об'єкта (логічний

рівень, що відповідає вільному променю). Мікроконтролер безперервно оновлює фонові рівні для кожного з дванадцяти каналів методом ковзного середнього з великою постійною часу. Це дозволяє компенсувати повільний дрейф нуля, спричинений зміною температури або старінням компонентів. Оновлення фону виконується тільки тоді, коли жоден сенсор не перекритий, щоб уникнути «заїдання» корисного сигналу. Шестирозрядний індикатор показує кількість успішних проходів (за замовчуванням) або інші параметри за вибором оператора. Звук не активний.

Коли людина наближається до арки(рис.3.2) і перетинає промінь вхідного оптичного сенсора Д1, виникає переривання або зміна рівня на вході мікроконтролера. Після підтвердження стабільності сигналу (усунення дребезгу протягом 10 мілісекунд) автомат переходить у стан АКТИВНИЙ. У цей момент фіксується час входу, заморожуються поточні фонові рівні (оновлення припиняється), обнуляються прапори виявлення металу для цього сеансу. Система починає інтенсивно аналізувати відхилення сигналів від замороженого фону. Користувач може перебувати в арці від кількох секунд до хвилини. У цьому стані можливі декілька варіантів розвитку подій.

Перший варіант – людина проходить арку наскрізь. Вона спочатку перекриває Д1, потім рухається всередину, де її металеві предмети викликають зміну сигналів на приймальних котушках, потім перетинає вихідний сенсор Д2 і нарешті залишає зону Д2. Якщо під час перебування між Д1 та Д2 (або після Д2, але до виходу з Д2) жоден канал не перевищив поріг, то після звільнення обох сенсорів автомат повертається в ОЧІКУВАННЯ, збільшує лічильник загальних проходів на одиницю і оновлює індикацію. Якщо ж хоча б один канал дав перевищення, то після перетину Д2 (тобто після того, як людина вийшла) автомат переходить у стан ТРИВОГА_ПІСЛЯ_ВИХОДУ. У цьому стані активується безперервний звуковий сигнал тривоги, на індикаторі відображається номер

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

зони (або мигаючий напис «AL»), збільшується лічильник тривоги і також лічильник проходів (оскільки людина пройшла). Сигнал тривоги не припиняється автоматично, оскільки оператор повинен вжити заходів. Вимкнути тривогу можна кнопкою (довге натискання) або через сервер ESP01. Якщо оператор не втручається, тривога триває до перезавантаження або до надходження команди скидання.

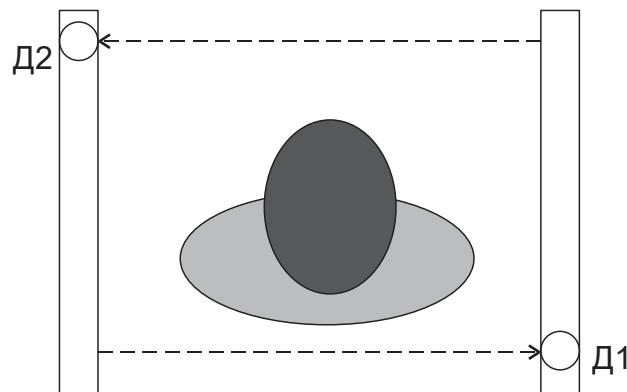


Рисунок 3.2 – Схема розташування оптичних сенсорів на металодетекторі

Другий варіант – людина увійшла в арку, але передумала і повернулася назад, не доходячи до Д2. У цьому разі після перетину Д1 у зворотному напрямку (тобто Д1 спочатку був перекритий, потім звільнився, а Д2 так і не був перекритий) автомат аналізує прапор виявлення металу. Якщо метал не виявлений, система просто повертається в ОЧІКУВАННЯ без зміни лічильників. Якщо метал виявлений, то переходить у стан ТРИВОГА_ПОВЕРНЕННЯ. У цьому стані активується звуковий сигнал тривалістю 30 секунд (наприклад, переривчастий тон), на індикаторі відображається код зони або повідомлення про спробу пронести метал. Лічильник проходів не збільшується, а лічильник тривоги збільшується на одиницю. Після закінчення 30 секунд звук припиняється, і автомат повертається в ОЧІКУВАННЯ.

Третій варіант – людина затримується всередині арки понад встановлений час (наприклад, 60 секунд), не перетинаючи жодного з сенсорів повністю (тобто Д1 залишається перекритим, а Д2 не перекривається). Це може бути навмисна спроба блокувати роботу або випадкова зупинка. Автомат має таймер, який запускається при вході в стан АКТИВНИЙ. Якщо таймер досягає границі, а жоден з сенсорів не змінив стану на вихід, система переходить у стан ТРИВОГА_ЗАСТРЯГ. У цьому стані генерується специфічний звук (наприклад, низькочастотні гудки з періодом 1 секунда), індикатор показує «StALL» або код помилки. Лічильники не змінюються. Сигнал триває до тих пір, поки людина не залишить арку (обидва сенсори не стануть вільними). Після звільнення автомат повертається в ОЧІКУВАННЯ, але лічильник тривоги збільшується (як фіксація аномальної події).

Четвертий варіант – ситуація, коли людина вже пройшла, але метал виявлено із запізненням, або коли людина стоїть на виході, перекриваючи Д2, але не залишає арку. Алгоритм передбачає, що після перетину Д2 (тобто коли Д2 став перекритим) система чекає звільнення Д2. Якщо Д2 залишається перекритим більше 10 секунд після того, як Д1 вже вільний, це також кваліфікується як затримка і переводить автомат у стан ТРИВОГА_ЗАСТРЯГ.

Особлива увага приділяється обробці кількох людей, які йдуть один за одним. Система не повинна скидати стан, поки хоча б один сенсор перекритий. Тому логіка побудована на лічильниках перетинів: кожне спрацювання Д1 збільшує лічильник входів, кожне спрацювання Д2 зменшує його. Стан АКТИВНИЙ підтримується, поки лічильник входів більше нуля. Це дозволяє коректно обробляти групу людей. Прапор виявлення металу стає активним, якщо хоча б одна людина в групі мала метал. Після того як лічильник входів стає нульовим, система вирішує, чи була тривога, і діє відповідно до правил, описаних вище.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

У стані ОЧІКУВАННЯ, крім оновлення фону, система також контролює, чи не з'явилося раптове велике відхилення без перетину сенсорів. Це може свідчити про заваду або несправність. У такому разі генерується попереджувальний сигнал, але автоматичного переходу в тривогу не відбувається. Оператор може проігнорувати або вимкнути систему.

Весь алгоритм реалізований без використання затримок, що блокують виконання коду. Усі часові інтервали відлічуються за допомогою системного таймера (SysTick) з періодом 1 мілісекунда. Це дозволяє головному циклу постійно опрацьовувати події, не пропускаючи переривання від АЦП та сенсорів.

3.2 Алгоритм ініціалізації вузлів переривань, генераторів, АЦП, переривань по оптодатчиках

Після подачі живлення мікроконтролер STM32G431 виконує скидання і запускає процедуру ініціалізації, яка налаштовує всі периферійні модулі(рис.3.3). Першим кроком є налаштування тактування. Системна частота встановлюється на 64 МГц від внутрішнього RC-генератора або зовнішнього кварцу. Вмикаються тактові сигнали для портів введення-виведення, таймерів TIM1, TIM2, TIM3, АЦП, DMA, UART, а також для зовнішніх переривань EXTI.

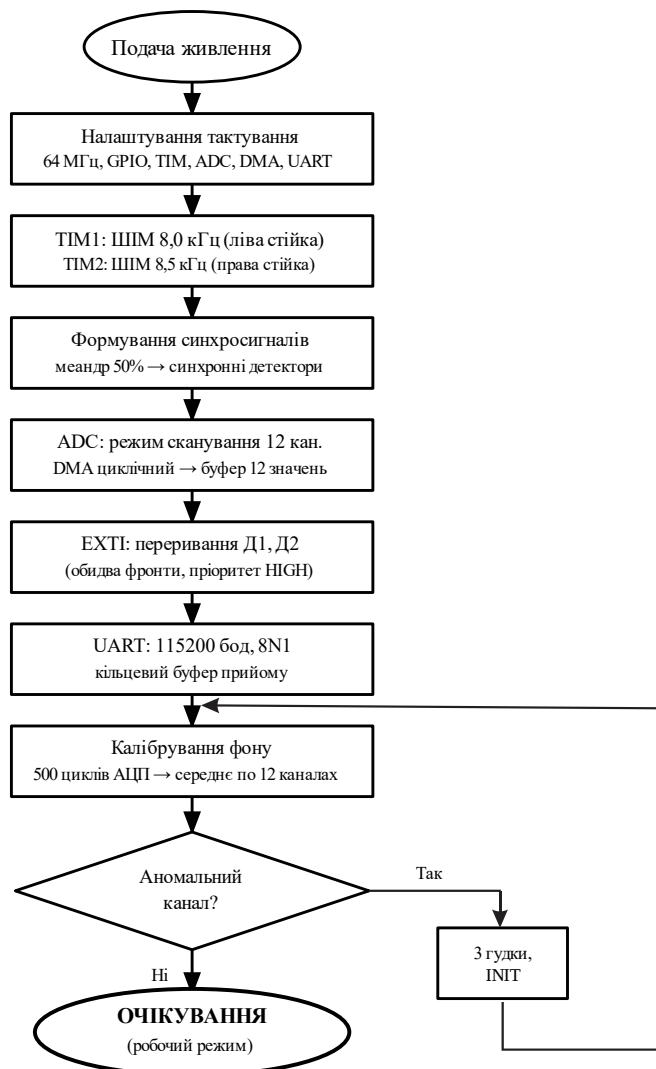


Рисунок 3.3 – Алгоритм ініціалізації мікроконтролерів

Для аналого-цифрового перетворення налаштовується АЦП (наприклад, ADC1). Оскільки необхідно опитувати дванадцять каналів, використовується режим сканування з послідовним перетворенням. Канали впорядковуються в послідовності: спочатку шість каналів лівої стійки (ADC_IN0...ADC_IN5), потім шість каналів правої стійки (ADC_IN6...ADC_IN11). Час вибірки встановлюється достатнім для заряджання вхідної ємності (наприклад, 47,5 циклів). Частота дискретизації визначається з розрахунку, щоб загальний час перетворення всіх каналів не перевищував 10 мілісекунд, що дає частоту опитування кожного каналу близько 100 Гц. Результати перетворень автоматично передаються в масив

за допомогою контролера прямого доступу до пам'яті (DMA). DMA налаштований на циклічний режим, тобто після заповнення буфера з дванадцяти значень він перезавантажується без участі процесора і генерує переривання по завершенню напівциклу або повного циклу [15]. У перериванні встановлюється прапор, що нові дані готові. Пріоритет DMA встановлюється високим, але нижчим, ніж для зовнішніх переривань від сенсорів, щоб не пропустити момент входу людини.

Оптичні сенсори (Д1 вхідний, Д2 вихідний) підключені до цифрових входів мікроконтролера, які налаштовані на генерацію переривання по зміні рівня (обидва фронти). Для кожного сенсора налаштовується окремий канал EXTI. У зовнішньому перериванні виконується мінімум роботи: фіксується час події за допомогою системного таймера, змінюється стан відповідного прапора, а основний алгоритм опрацьовує цю подію в головному циклі. Це необхідно для усунення дребезгу, оскільки в перериванні не можна виконувати затримки. Для фільтрації дребезгу використовується підпрограма, яка перевіряє стабільність сигналу протягом 10 мілісекунд шляхом повторного зчитування в кількох послідовних циклах головного циклу.

Кнопка налаштувань також підключена до входу з перериванням або опитується в головному циклі. Оскільки кнопка використовується рідко, достатньо опитування з фільтрацією. Для зв'язку з ESP01 налаштовується UART (наприклад, USART1) зі швидкістю 115200 бод, 8 біт даних, 1 стоп-біт, без контролю парності [15]. Переривання прийому дозволене, дані накопичуються в кільцевому буфері.

Після налаштування всіх модулів мікроконтролер виконує процедуру калібрування фонових рівнів. Вона полягає в тому, що протягом 5 секунд (або 500 циклів АЦП) накопичуються значення для кожного каналу, обчислюється середнє арифметичне. Це початкове значення записується як фон. Якщо якийсь канал показує аномально високе або низьке значення

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56

(наприклад, через несправність котушки або наявність поруч масивного металу), система видає попереджувальний сигнал (три коротких гудки) і залишається в стані ініціалізації до усунення проблеми. Після успішного калібрування система переходить у стан ОЧІКУВАННЯ.

Усі переривання мають призначені пріоритети. Найвищий пріоритет мають переривання від оптичних сенсорів, оскільки вони визначають логіку роботи. Далі йдуть переривання DMA (завершення циклу АЦП), потім переривання таймерів (не використовуються для генерації, оскільки таймери працюють в апаратному режимі), потім UART. Переривання від кнопки мають найнижчий пріоритет.

3.3 Алгоритм визначення середнього рівня і відхилення від середнього

Для кожного з дванадцяти каналів у пам'яті зберігається поточне середнє значення (фон) та масив останніх N вимірювань для обчислення ковзного середнього (рис.3.4). Розмір масиву вибирається компромісно: чим більше N , тим повільніше реагування на зміни, але краще пригнічення шумів. У даній системі $N = 16$, що дає постійну часу близько 160 мілісекунд при частоті опитування 100 Гц [13]. Це достатньо для згладжування випадкових завад, але не заважає виявленню сигналів від металу, які змінюються за 0,5-2 секунди.

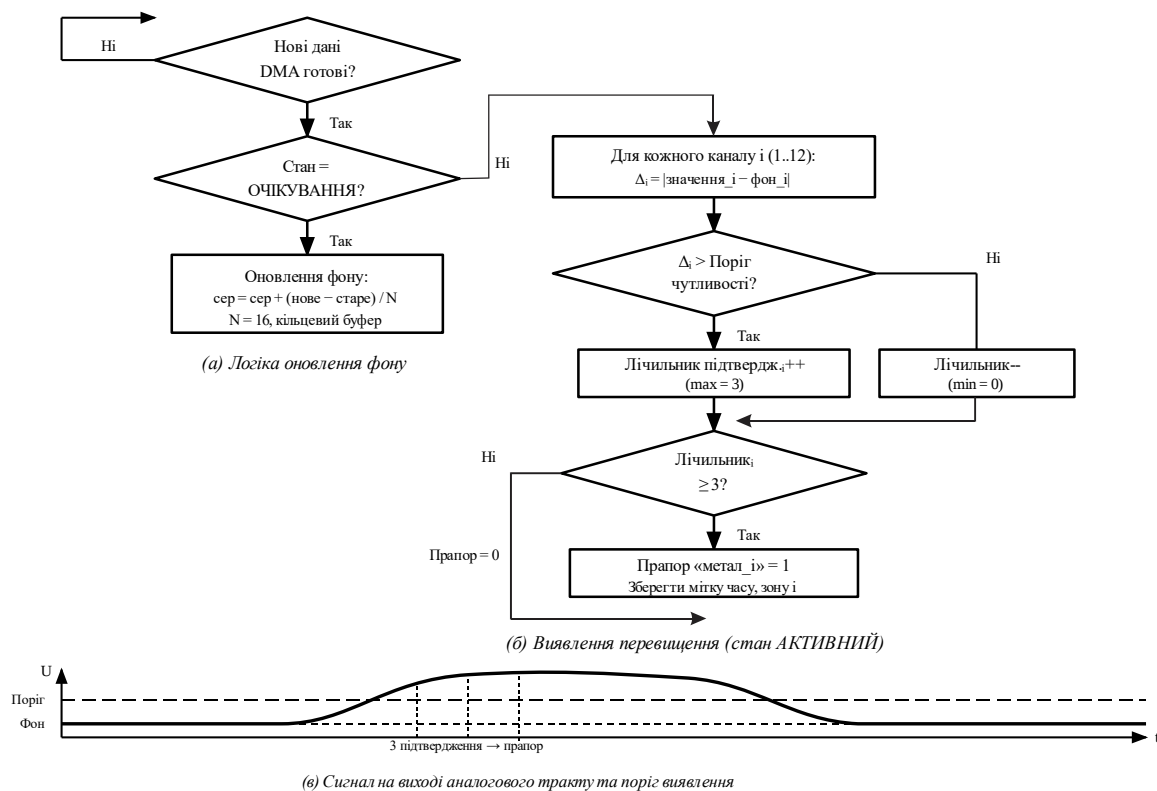


Рисунок 3.4 – Алгоритми обчислення ковзного середнього та виявлення відхилення

Оновлення середнього значення виконується тільки в стані ОЧІКУВАННЯ, коли арка порожня. У цьому стані після кожного нового вимірювання (отриманого від DMA) для кожного каналу обчислюється нове ковзне середнє: з масиву видаляється найстаріше значення, додається нове, і сума ділиться на N . Це ефективно реалізується за допомогою кільцевого буфера та накопичувальної суми. Формула оновлення: $\text{нове_середнє} = \text{старе_середнє} + (\text{нове_значення} - \text{старе_значення}) / N$. Такий підхід не вимагає зберігання всього масиву, достатньо зберігати суму та поточний індекс. Однак для простоти можна зберігати масив. Оновлення виконується дуже швидко.

Коли система переходить в стан АКТИВНИЙ (після спрацювання Д1), поточні середні значення заморожуються. Під час активного моніторингу фон не оновлюється, навіть якщо вимірювання відрізняються. Це необхідно, щоб корисний сигнал від металу не «вливався» в фон, що призвело б до

зменшення чутливості. Виміряне значення для кожного каналу порівнюється із замороженим фоном. Різниця обчислюється як $\text{різниця_поточного} = \text{поточне_значення} - \text{фон}$. Оскільки сигнал може бути як додатним, так і від'ємним (залежно від типу металу та фази), для подальшого аналізу береться абсолютне значення різниці, але знак зберігається для можливої дискримінації матеріалів. Для виявлення факту перевищення використовується поріг чутливості, який задається оператором (від 1 до 6). Поріг може бути як абсолютним (наприклад, 20 мВ у перерахунку на вхід АЦП), так і відносним (відсоток від фону). У даній системі використовується абсолютний поріг, оскільки фон стабільний.

Для зменшення кількості хибних спрацювань від імпульсних завад алгоритм вимагає, щоб перевищення порогу спостерігалось в трьох послідовних циклах опитування (тобто протягом приблизно 30 мілісекунд) [14]. Це реалізовано за допомогою лічильників підтвердження для кожного каналу. Коли абсолютне відхилення перевищує поріг, лічильник збільшується; коли не перевищує – зменшується (але не нижче нуля). Прапор «метал виявлено» для каналу встановлюється, коли лічильник досягає значення 3. Скидається прапор, коли лічильник падає до нуля (тобто після зникнення сигналу). Така схема запобігає спрацюванню від одиничних викидів.

Крім того, алгоритм обчислює середньоквадратичне відхилення (або просто максимальне відхилення) для кожного каналу в реальному часі, але це використовується лише для діагностики, а не для ухвалення рішення. У стані ОЧІКУВАННЯ, коли фон оновлюється, також обчислюється дисперсія шуму. Якщо дисперсія раптово зростає (наприклад, через зовнішню заваду), система може тимчасово підвищити поріг або видати попередження. Це реалізовано як додаткова функція безпеки.

У разі, коли система перебуває в стані АКТИВНИЙ і виявлено перевищення, значення відхилення (абсолютне) зберігається в масиві для

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

кожного каналу разом з міткою часу. Це дозволяє вищій логіці (оптичний автомат) знати, яка зона спрацювала, і навіть оцінити амплітуду сигналу. Оскільки аналоговий тракт вже виконав інтегрування та диференціювання, відхилення на вході АЦП пропорційне масі та типу металу. Однак у даній роботі основна мета – просто виявити факт наявності металу, тому детальний аналіз амплітуди не проводиться. Проте масив відхилень може бути корисним для налагодження.

3.4 Алгоритм обробки сигналів перевищення

Коли в стані АКТИВНИЙ для будь-якого з дванадцяти каналів прапор «метал виявлено» стає істинним, система повинна зафіксувати цю подію і передати її до скінченного автомата. Оскільки канали опитуються незалежно, можлива ситуація, коли кілька каналів спрацювують майже одночасно (наприклад, великий предмет перекриває дві зони по вертикалі). Алгоритм обробки передбачає, що за один сеанс проходження достатньо одного факту перевищення, щоб вважати тривогу(рис.3.5). Тому використовується глобальний прапор «тривога_за_сеанс», який встановлюється при першому ж спрацюванні будь-якого каналу. Після цього інші спрацювання ігноруються для цього сеансу, але зберігається інформація про те, які саме зони спрацювали (для індикації оператору).

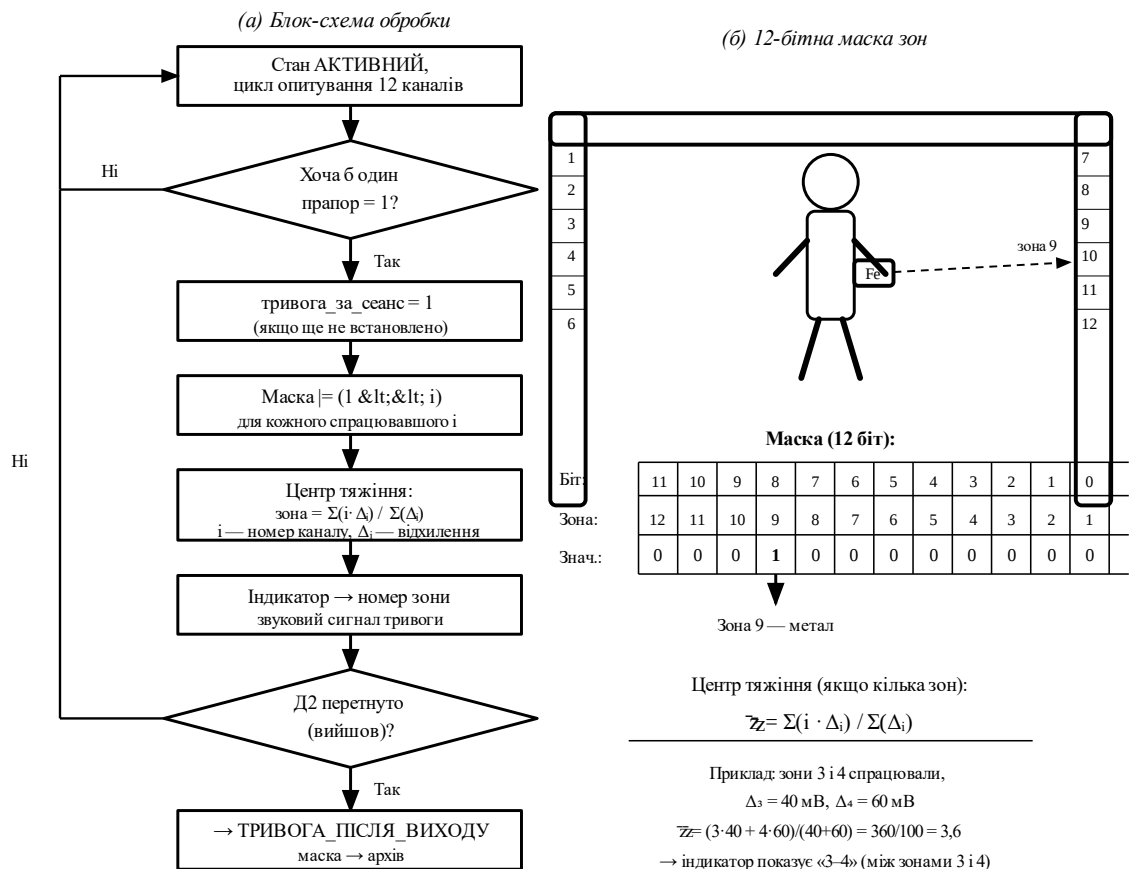


Рисунок 3.5 – Алгоритм обробки сигналів перевищення та локалізація ЗОНИ

Для зберігання інформації про зони використовується 12-бітна маска (або масив байтів). Кожен біт відповідає одному каналу. При встановленні прапора для каналу відповідний біт маски встановлюється. Маска зберігається до кінця сеансу (тобто до повернення в стан ОЧІКУВАННЯ). Після завершення проходу (або повернення) маска використовується для визначення, яка зона показала метал. Це дозволяє на індикаторі показати номер зони (наприклад, від 1 до 12). Якщо спрацювало кілька зон, індикатор може циклічно відображати їх номери або показати найбільш інтенсивну.

Алгоритм також обробляє випадок, коли перевищення з'являється і зникає дуже швидко (наприклад, дрібна монета, яка швидко пролетіла). Завдяки другому інтегратору в аналоговому тракті, сигнал утримується протягом декількох секунд, тому навіть швидкий предмет буде

зафіксований. Однак на рівні мікроконтролера додаткове підтвердження (три послідовні перевищення) може не встигнути спрацювати, якщо предмет дуже малий і швидкий. Тому для таких випадків передбачено альтернативний режим: якщо в аналоговому тракті використовується піковий детектор, то достатньо одиничного перевищення. Але в описаній схемі з двома інтеграторами сигнал стає тривалим, тому три послідовні вимірювання завжди встигають. Для гарантії можна зменшити кількість підтверджень до двох або навіть одного, але це підвищить ризик хибних спрацювань. Компроміс – встановити два підтвердження.

Окремим випадком є ситуація, коли людина стоїть нерухомо всередині арки, а метал знаходиться в нерухомому полі. У такому разі сигнал на виході другого інтегратора буде постійним (оскільки похідна дорівнює нулю). Це призведе до того, що відхилення буде присутнім, але воно не буде зникати. Алгоритм правильно виявить перевищення при першому ж вимірюванні і встановить прапор. Оскільки прапор залишається активним, поки відхилення перевищує поріг, тривога буде утримуватися. Це відповідає вимозі: якщо людина зупинилася з металом, система повинна сигналізувати, поки вона не вийде або не прибере метал. Якщо ж людина вийде, але сигнал залишиться через інерційність інтегратора, прапор скинеться після того, як відхилення стане менше порогу (через розряд конденсатора). Для прискорення скидання можна передбачити примусове обнулення другого інтегратора через ключ, але в даній реалізації це не передбачено.

Для локалізації зони використовується аналіз маски. Якщо спрацював один канал, індикатор показує його номер (1-12). Якщо спрацювало кілька сусідніх каналів, система може визначити центр тяжіння за формулою: $\text{номер_зони} = \text{сума}(\text{номер_каналу} * \text{відхилення}) / \text{сума}(\text{відхилень})$. Це дає більш точне положення по висоті. Однак для простоти можна показати

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

діапазон (наприклад, «3-5»). У даній роботі достатньо вивести перший спрацювавший канал або всі через кому.

3.5 Алгоритм роботи веб-сервера доступу на базі ESP01

3.5.1 Архітектурне рішення та розподіл відповідальності

Модуль ESP01 виконує роль мережевого транспорту і HTTP-представлення: він приймає запити від браузера, пересилає їх через UART до мікроконтролера STM32G431, отримує відповідь і повертає її клієнту. Уся логіка автентифікації, зберігання паролів, лічильників і порогів чутливості реалізована виключно на STM32G431. ESP01 не зберігає паролів, не містить бази користувачів і не приймає самостійних рішень про надання доступу.

Таке розмежування відповідальності вирішує принципову задачу безпеки: модуль ESP01, фізично вилучений з одного пристрою і підключений до іншого, не надасть доступу до нового пристрою, оскільки паролі та сесійні ключі зберігаються у флеш-пам'яті конкретного STM32G431 і прив'язані до його унікального ідентифікатора. Кожен металодетектор має власний, незалежно згенерований набір облікових даних, що унеможливорює «перехресний» несанкціонований доступ.

Мікроконтролер STM32G431 зберігає у внутрішній флеш-пам'яті (у виділеній сторінці, окремій від коду) наступні параметри: хеш пароля адміністратора, хеш пароля оператора, поточний поріг чутливості, лічильник загальних проходів, лічильник тривоги, лічильник подій безпеки, а також унікальний 32-бітний ідентифікатор пристрою, що генерується при першому запуску з використанням апаратного генератора псевдовипадкових чисел STM32G431 (RNG). Для хешування паролів використовується алгоритм SHA-256, що реалізований програмно на STM32G431.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.5.2 Протокол обміну між ESP01 і STM32G431

Обмін між ESP01 і STM32G431 відбувається через UART зі швидкістю 115200 бод, 8N1. Для уникнення колізій між повідомленнями використовується текстовий протокол із синхронізацією по символу нового рядка. Кожна команда від ESP01 до STM32G431 має формат:

<КОМАНДА> [параметр]\n

Відповідь STM32G431 завжди починається з «OK» або «ERR» і закінчується символом нового рядка. Для команд, що повертають дані, відповідь має формат:

OK <дані>\n

Перед відправленням будь-якої команди від клієнта ESP01 надсилає до STM32G431 запит автентифікації сесії:

AUTH <challenge_response>\n

де challenge_response — HMAC-SHA256 від конкатенації сесійного випадкового числа і введеного пароля. Сесійне число (nonce) генерується STM32G431 при кожному новому TCP-з'єднанні і надсилається ESP01 у відповідь на запит «GETCHALLENGE». ESP01 передає nonce браузеру у прихованому полі HTML-форми. Браузер обчислює challenge_response на стороні клієнта засобами JavaScript і надсилає його з формою. Таким чином, пароль у відкритому вигляді не передається ні в мережі, ні через UART.

Після отримання AUTH STM32G431 обчислює очікуваний HMAC від збереженого хешу пароля і порівнює з отриманим. При збігу формується сесійний токен — 16-байтне випадкове число, що зберігається в оперативній пам'яті STM32G431 і є дійсним протягом 15 хвилин. Усі наступні команди в цьому TCP-з'єднанні ESP01 супроводжує цим токеном:

TOKEN <16-byte-hex> SETTHRESHOLD 3\n

Якщо токен не збігається або прострочений, STM32G431 відповідає «ERR AUTH», і ESP01 повертає клієнту сторінку повторної автентифікації.

3.5.3 Повний перелік команд протоколу

Команда GETCHALLENGE не вимагає автентифікації і повертає 8-байтний nonce у шістнадцятковому форматі:

GETCHALLENGE\n → OK A3F2819C4D7E0B21\n

Команда AUTH передає challenge_response і отримує сесійний токен:

AUTH <hmac_hex>\n → OK <token_hex>\n або ERR AUTH\n

Команда GETSTATUS повертає JSON-рядок з поточним станом системи:

TOKEN <t> GETSTATUS\n → OK

{"mode":"IDLE","sens":3,"pass":1247,"alarm":4,"sec":0}\n

Команда SETTHRESHOLD встановлює поріг чутливості (значення 1–6):

TOKEN <t> SETTHRESHOLD <1..6>\n → OK\n або ERR RANGE\n

Команда RESETCOUNTERS скидає лічильники проходів і тривог (доступна лише адміністратору):

TOKEN <t> RESETCOUNTERS\n → OK\n або ERR AUTHZ\n

Команда RESETALARM скидає поточний активний стан тривоги (аналог довгого натискання кнопки):

TOKEN <t> RESETALARM\n → OK\n або ERR STATE\n

Команда CHANGEPASS ініціює процедуру зміни пароля. Новий пароль передається у вигляді SHA-256 хешу, обчисленого браузером:

TOKEN <t> CHANGEPASS <sha256_new_pass_hex>\n → OK\n

Команда PING використовується для перевірки зв'язку і отримання мінімального стану:

PING\n → PONG <mode>\n

3.5.4 Структура HTTP-сервера на ESP01

Програма ESP01 написана на мові C із використанням SDK ESP8266 NonOS або ESP-IDF. ESP01 запускається в режимі точки доступу Wi-Fi (SoftAP) із прихованим SSID і паролем мережі, що зберігається у флеш-пам'яті ESP01 (окремо від паролів металодетектора) [16]. Це єдиний елемент конфігурації, що зберігається на самому ESP01. Ціна заміни ESP01 — лише повторне введення пароля мережі через послідовний інтерфейс при первинному налаштуванні.

HTTP-сервер прослуховує TCP-порт 80. При надходженні нового з'єднання ESP01 надсилає GETCHALLENGE до STM32G431, отримує nonce і вбудовує його в HTML-сторінку входу. Сторінка містить форму з полями логін і пароль. Після відправлення форми браузером JavaScript на стороні клієнта обчислює HMAC-SHA256(nonce + password) і відправляє POST-запит. ESP01 надсилає AUTH до STM32G431 і, отримавши токен, зберігає його як cookie із часом життя 15 хвилин і перенаправляє браузер на головну сторінку керування.

Головна сторінка керування генерується ESP01 динамічно: після отримання даних від GETSTATUS вона відображає поточний режим системи, поріг чутливості (з можливістю вибору 1–6), значення трьох лічильників (проходи, тривоги, події безпеки). Сторінка автоматично оновлюється кожні 5 секунд через JavaScript fetch-запит до кінцевої точки /api/status, що повертає JSON. Це виключає повне перезавантаження сторінки і знижує навантаження на ESP01.

При натисканні кнопок «Скинути лічильники», «Скинути тривогу» або «Змінити пароль» браузер надсилає POST-запит до відповідних кінцевих точок. ESP01 витягує токен з cookie запиту, формує відповідну команду протоколу і пересилає до STM32G431. Відповідь STM32G431 транслюється у HTTP-відповідь із відповідним HTTP-кодом (200 OK або 403 Forbidden).

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.5.5 Розмежування рівнів доступу

STM32G431 розрізняє два рівні доступу: оператор і адміністратор. Оператор може переглядати стан системи, змінювати поріг чутливості та скидати активну тривогу. Адміністратор додатково може скидати лічильники та змінювати паролі обох рівнів. При автентифікації STM32G431 перевіряє введений пароль відповідно до обох збережених хешів і повертає в складі сесійного токена однобітний прапор рівня доступу. ESP01 вбудовує цей прапор у cookie і використовує його для відображення або приховування адміністративних елементів інтерфейсу. Авторитативну перевірку рівня доступу при виконанні команди виконує STM32G431, перевіряючи токен незалежно від того, що передає ESP01.

3.5.6 Захист від підбору пароля і атак на доступність

STM32G431 відстежує кількість невдалих спроб AUTH. Після трьох підряд невдалих спроб він повертає ERR LOCKED і блокує спроби AUTH протягом 60 секунд. ESP01 відображає клієнту сторінку блокування з відліком часу. Інформація про блокування зберігається в оперативній пам'яті STM32G431 і скидається при перезавантаженні. Кожна невдала спроба збільшує лічильник подій безпеки, що зберігається у флеш-пам'яті.

Для захисту від перевантаження ESP01 реалізує обмеження кількості одночасних TCP-з'єднань (не більше двох). Нові з'єднання понад ліміт відхиляються на рівні TCP. Це запобігає вичерпанню пам'яті ESP01 при SYN-flood атаках. Також реалізовано тайм-аут неактивного з'єднання: якщо клієнт не надіслав запит протягом 30 секунд після встановлення TCP-з'єднання, з'єднання закривається. Сесійний токен на STM32G431 інвалідується після закінчення 15 хвилин незалежно від стану з'єднання.

ESP01 виконує базову санітизацію вхідних HTTP-запитів: перевіряє довжину URL (не більше 128 байт), довжину тіла POST-запиту (не більше 512 байт) і допустимі символи в параметрах команди перед передачею до

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		67

STM32G431. Команди, що містять символи поза межами ASCII 0x20–0x7E або перевищують очікувану довжину, відкидаються без відправлення до UART.

3.5.7 Механізм взаємної перевірки зв'язку

ESP01 надсилає команду PING кожні 30 секунд. Якщо STM32G431 не відповів на три послідовних PING (тобто протягом 90 секунд), ESP01 відображає на головній сторінці стан «Зв'язок відсутній» і блокує всі команди керування до відновлення зв'язку. Стан відображення не змінює роботи основного алгоритму STM32G431 — металодетектор продовжує функціонувати в автономному режимі незалежно від стану ESP01.

STM32G431 може ініціювати перезавантаження ESP01 через окремий вивід GPIO, підключений до виводу RST ESP01. Це використовується при зависанні ESP01, яке діагностується відсутністю будь-якого трафіку на UART протягом 5 хвилин. Після апаратного скидання ESP01 повторно ініціалізується і відновлює TCP-сервер без втрати налаштувань, що зберігаються в його флеш-пам'яті.

3.5.8 Зберігання даних у флеш-пам'яті STM32G431

Дані, що мають зберігатися між відключеннями живлення, розміщуються в останній сторінці флеш-пам'яті STM32G431 (сторінка 63, розмір 2 кБ). Перед записом сторінка стирається і записується повністю. Для захисту від пошкодження даних при раптовому відключенні живлення під час запису використовується схема подвійного буфера: дві половини сторінки по 1 кБ чергуються, і у кожній є поле CRC32 та монотонний лічильник записів. При завантаженні система обирає половину з валідною CRC та більшим лічильником. Структура збережених даних:

```
typedef struct {  
    uint32_t magic; // 0xDEAD1234 – маркер валідного запису  
    uint32_t device_id; // унікальний ID, генерується при першому запуску  
    uint32_t write_counter; // монотонний лічильник для вибору актуальної копії
```

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

uint8_t admin_hash[32]; // SHA-256 хеш пароля адміністратора
uint8_t oper_hash[32]; // SHA-256 хеш пароля оператора
uint8_t threshold; // поріг чутливості 1..6
uint32_t count_pass; // лічильник проходів
uint32_t count_alarm; // лічильник тривоги
uint32_t count_security; // лічильник подій безпеки
uint32_t crc32; // CRC32 від всіх полів вище
} NVM_Data_t;

```

При першому запуску (magic не дорівнює 0xDEAD1234 або CRC невалідна) система генерує новий device_id через RNG, встановлює паролі за замовчуванням (хеш від рядка «admin» і «oper»), записує початкову структуру і виводить на індикатор «INIT» з вимогою зміни паролів через веб-інтерфейс.

3.5.9 Прив'язка ESP01 до конкретного пристрою

При встановленні UART-зв'язку STM32G431 надсилає ESP01 свій device_id у складі відповіді на перший PING. ESP01 зберігає цей ідентифікатор у своїй оперативній пам'яті і вбудовує його у заголовок кожної сторінки (наприклад, «Металодетектор ID: A3F2819C»). Функціонально це не запобігає підключенню ESP01 до іншого пристрою, але оператор одразу бачить ідентифікатор пристрою, до якого підключений, і може виявити підміну. Авторитативний захист від підміни забезпечується тим, що паролі зберігаються виключно на STM32G431: навіть якщо зломисник підключить ESP01 до іншого металодетектора, він опиниться перед формою автентифікації нового пристрою з невідомими йому паролями.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.6 Програмна реалізація системи

3.6.1. Апаратна генерація двох синусоїдальних сигналів збудження з використанням ЦАП, DMA, таймерів та аналогової комутації

У розроблюваному апаратному металодетекторі необхідно сформувати два незалежних синусоїдальних сигнали різних частот для живлення лівої та правої випромінювальних котушок. Відповідно до структурної схеми, ліва стійка працює на частоті $f_1 = 8,0$ кГц, права – на частоті $f_2 = 8,5$ кГц. Мікроконтролер STM32G431 має обмежені апаратні ресурси: він містить чотири 12-бітних ЦАП-канали, з яких лише два є буферизованими зовнішніми каналами (1 MSPS), а два інших – внутрішніми небуферизованими (15 MSPS). Для випромінювальних котушок потрібен відносно великий вихідний струм, який забезпечується підсилювачем потужності LM4950, тому ЦАП формує лише низькорівневий сигнал, який потім підсилюється. Оскільки в системі є два незалежних підсилювачі потужності (один на ліву, інший на праву котушку), необхідно забезпечити два окремі аналогові сигнали. Однак STM32G431 має лише два буферизовані ЦАП-виходи, що унеможлиблює пряме формування двох незалежних сигналів без додаткових апаратних рішень. Тому пропонується використовувати один ЦАП, який працює в режимі подвійної швидкості або з подвійним буфером, і аналоговий мультиплексор для комутації вихідного сигналу між двома каналами (рис.3.6). Крім того, генерацію синусоїд можна реалізувати за допомогою ШІМ з фільтром низьких частот, що є простішим апаратним рішенням, але має гірші спектральні характеристики.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

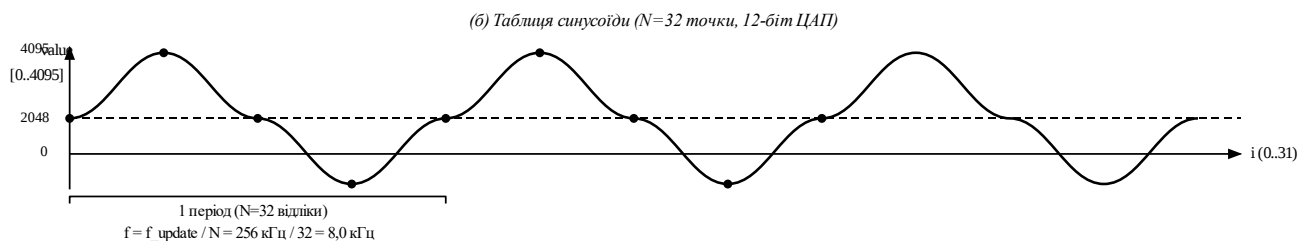
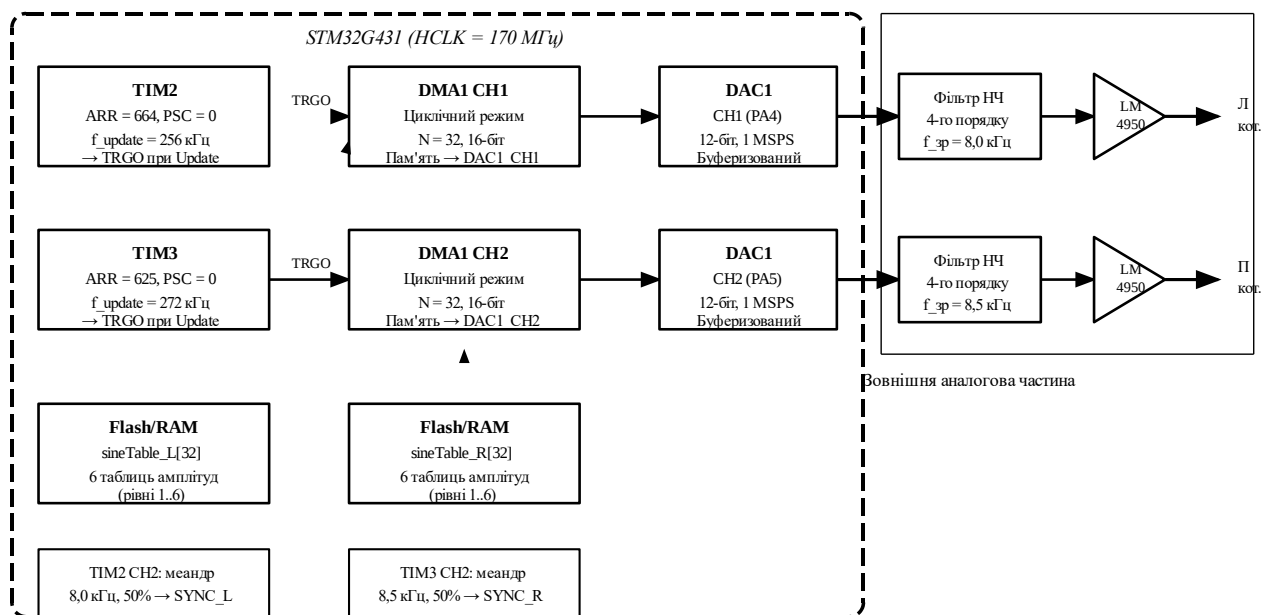


Рисунок 3.6 – Структура апаратної генерації синусоїдальних сигналів (DAC+DMA+TIM)

Виходячи з аналізу ресурсів, у даній роботі обирається гібридний підхід: формування синусоїдальних сигналів за допомогою ЦАП з використанням DMA та таймерів для точного контролю частоти, а потім мультиплексування цих сигналів на два вихідні канали за допомогою аналогового комутатора. Такий підхід дозволяє зберегти високі спектральні характеристики синусоїди (низький коефіцієнт гармонік) при мінімальному використанні ресурсів мікроконтролера.

3.6.2 Аналіз ресурсів ЦАП STM32G431

STM32G431 має чотири 12-бітних ЦАП-канали, але лише два з них (DAC1_OUT1 та DAC1_OUT2) є буферизованими і можуть бути виведені на зовнішні контакти. Буферизація необхідна для зменшення вихідного

імпедансу, що дозволяє підключати ЦАП безпосередньо до наступного каскаду без додаткового операційного підсилювача. Максимальна швидкість оновлення буферизованих ЦАП становить 1 MSPS, що є достатнім для формування сигналів частотою 8–10 кГц навіть з великою кількістю точок на період. Опорна напруга ЦАП (VDDA) становить 3,3 В, тому вихідна напруга змінюється в діапазоні 0–3,3 В. Для синусоїдального сигналу без постійної складової необхідно змістити його на половину діапазону, тобто на 1,65 В. Це реалізується шляхом додавання до таблиці значень синуса константи $OFFSET = 2048$ (оскільки $4095 * 0,5 \approx 2048$). Формула для обчислення значення для i -ї точки при N точках на період: $value[i] = OFFSET + AMPLITUDE * \sin(2\pi * i / N)$, де $AMPLITUDE$ вибирається з урахуванням бажаної амплітуди вихідного сигналу (наприклад, 2048 для максимальної амплітуди 1,65 В).

3.6.3 Обґрунтування вибору методу генерації

Існує кілька методів генерації синусоїдальних сигналів на мікроконтролерах: програмний розрахунок значень у реальному часі, використання таблиці з DMA та таймером, апаратна генерація за допомогою ШІМ з фільтром. Програмний розрахунок вимагає значних обчислювальних ресурсів і нестабільний через переривання. ШІМ з фільтром простіший, але має гірші спектральні характеристики через наявність гармонік, які важко повністю придушити. Найкращим є метод DMA+TIM+DAC, який реалізує повністю апаратну генерацію без участі CPU. У цьому методі попередньо обчислена таблиця значень синусоїди зберігається в пам'яті. Таймер генерує переривання (або сигнал TRGO) з частотою, що визначає частоту вихідного сигналу. Цей сигнал запускає DMA, яке переносить одне значення з таблиці в регістр даних ЦАП. DMA працює в циклічному режимі, тому після досягнення кінця таблиці передача починається спочатку. Така схема забезпечує високу стабільність частоти та мінімальне навантаження на CPU. Для формування двох різних частот

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		72

можна використовувати два таймери та два DMA-канали, але оскільки ЦАП лише один, необхідно мультиплексувати вихід.

3.6.4 Розрахунок частот і вибір кількості точок

Частота вихідного сигналу визначається частотою оновлення ЦАП та кількістю точок на період: $f_{out} = f_{update} / N$, де N – кількість точок у таблиці. Частота оновлення встановлюється таймером, який генерує події (TIMx_TRGO) з періодом T_{update} . Для отримання стабільного сигналу необхідно, щоб частота оновлення була якомога вищою, але обмежена швидкодією ЦАП (1 MSPS) та часом перемикання мультиплексора. Компромісним є вибір частоти оновлення 200 кГц для кожного каналу. Це означає, що мультиплексор повинен перемикатися між двома каналами з частотою 400 кГц (200 кГц на канал). При цьому кількість точок на період для частоти 8,0 кГц становить $N1 = 200000 / 8000 = 25$. Для частоти 8,5 кГц $N2 = 200000 / 8500 \approx 23,5$, що не є цілим числом. Тому необхідно або скоригувати частоти, або використовувати різні частоти оновлення для різних каналів. Оскільки мультиплексор комутує сигнал від одного ЦАП, частота оновлення є спільною. Тому доцільно вибрати частоту оновлення, яка забезпечує цілу кількість точок для обох частот, або використовувати інтерполяцію.

Альтернативним підходом є використання двох незалежних каналів ЦАП (DAC1_OUT1 та DAC1_OUT2), які працюють одночасно. У цьому випадку можна використовувати два окремі таймери та два DMA-канали. STM32G431 дозволяє налаштувати DAC1 для роботи в режимі подвійних даних (double data mode), коли 32-бітне слово DMA записується одночасно в обидва канали. Це дозволяє генерувати два незалежних сигнали без мультиплексування. Частота оновлення кожного каналу визначається таймером, який запускає DMA. Для цього необхідно налаштувати таймер на генерацію події з частотою, кратною бажаній частоті оновлення. Наприклад, якщо для лівої стійки потрібна частота оновлення 200 кГц, а для

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

правої – 212,5 кГц, то можна використовувати два таймери (TIM2 та TIM3) або один таймер з двома каналами порівняння. Оскільки STM32G431 має багато таймерів, доцільно використовувати два окремі таймери для гнучкості.

У даній роботі обирається варіант з використанням двох каналів ЦАП і двох таймерів. Це дозволяє уникнути додаткового аналогового мультиплексора, зменшити спотворення сигналу та спростити програмування. Кількість точок на період вибирається з міркувань якості сигналу та обмеження пам'яті. 32 точки є компромісом: при 12-бітному ЦАП це дає прийнятний рівень гармонік (близько -30 дБ) і займає лише 64 байти на таблицю (32 значення по 2 байти). 64 точки покращують якість, але збільшують вимоги до частоти оновлення та пам'яті. Оскільки частота оновлення обмежена 1 MSPS, для 64 точок максимальна частота сигналу становить $1 \text{ МГц} / 64 = 15,6 \text{ кГц}$, що достатньо. Для спрощення розрахунків обирається $N = 32$ точки для обох каналів. Частота оновлення для лівого каналу $f_{\text{update1}} = f_1 * N = 8000 * 32 = 256000 \text{ Гц}$. Для правого каналу $f_{\text{update2}} = f_2 * N = 8500 * 32 = 272000 \text{ Гц}$. Ці частоти знаходяться в межах можливостей ЦАП (1 MSPS). Розрахунок регістрів таймерів виконується за формулою: $\text{PSC} = (\text{HCLK} / (f_{\text{update}} * \text{ARR})) - 1$, де HCLK – частота ядра (170 МГц), ARR – значення автоперезавантаження. Для зручності ARR вибирається однаковим для обох таймерів, наприклад, $\text{ARR} = 1000$. Тоді $\text{PSC1} = (170000000 / (256000 * 1000)) - 1 \approx 0,66 - 1$, що не є цілим. Тому краще використовувати ARR як основний параметр. Наприклад, для лівого каналу: $\text{ARR1} = 170000000 / 256000 \approx 664$, тоді $\text{PSC1} = 0$. Для правого: $\text{ARR2} = 170000000 / 272000 \approx 625$, $\text{PSC2} = 0$. Такі значення є прийнятними.

3.6.5 Створення таблиць синусоїд

Таблиці значень синусоїд обчислюються заздалегідь і зберігаються в пам'яті як масиви `uint16_t`. Для 12-бітного ЦАП діапазон значень 0-4095. Для усунення постійної складової використовується зміщення на 2048.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Амплітуду можна регулювати для зміни чутливості (як описано в розділі 2). Оскільки в системі передбачено 6 рівнів чутливості, доцільно створити окремі таблиці для кожного рівня або використовувати один базовий масив і масштабувати його в реальному часі. Масштабування в реальному часі вимагає додаткових обчислень, тому краще створити таблиці для різних амплітуд. Для мінімізації пам'яті можна зберігати базову таблицю з максимальною амплітудою, а для зменшення амплітуди просто змінювати значення, що передаються в DMA. Це можна зробити шляхом зміни таблиці або використання множника в DMA (не підтримується). На практиці простіше перемикати DMA на іншу таблицю при зміні чутливості. Оскільки чутливість змінюється рідко, це прийнятне рішення.

Формула для обчислення значення для i -ї точки: $\text{value}[i] = (\text{uint16_t})(2048 + A * \sin(2\pi * i / N))$, де A – бажана амплітуда (0..2048). Для максимальної амплітуди $A = 2048$, значення будуть змінюватися від 0 до 4095. Для мінімальної (50%) $A = 1024$. Для кожного з 6 рівнів чутливості створюється окремий масив. Це займає $6 * 32 * 2 = 384$ байти, що є незначним обсягом пам'яті.

3.6.6 Конфігурація ЦАП, таймерів та DMA

Для реалізації генерації використовуються два таймери (наприклад, TIM2 для лівого каналу та TIM3 для правого), два DMA-канали (один для DAC1_CH1, інший для DAC1_CH2) та сам ЦАП [10]. Налаштування виконуються за допомогою HAL або безпосередньо через регістри.

ЦАП конфігурується таким чином. Вмикаються тактові сигнали для DAC1 та GPIOA (оскільки виходи DAC1_OUT1 та DAC1_OUT2 знаходяться на порту PA4 та PA5). Конфігуруються виходи PA4 та PA5 як аналогові. Для кожного каналу ЦАП налаштовується тригер від відповідного таймера (TIM2_TRGO для CH1, TIM3_TRGO для CH2), вмикається DMA для каналу та вибирається режим роботи (нормальний або

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

подвійний). DMA налаштовується в циклічному режимі для безперервної передачі.

Таймери конфігуруються для генерації події TRGO при кожному оновленні (Update Event). Частота оновлення розраховується виходячи з бажаної частоти оновлення ЦАП. Для лівого каналу частота оновлення 256 кГц, для правого – 272 кГц. Розраховуються значення регістрів PSC та ARR. Наприклад, для HCLK = 170 МГц: $ARR1 = 170000000 / 256000 = 664$, $PSC1 = 0$; $ARR2 = 170000000 / 272000 = 625$, $PSC2 = 0$. Таймери запускаються після налаштування DMA та ЦАП.

DMA налаштовується для передачі з пам'яті в периферію (DAC1_DHR12R1 для CH1 та DAC1_DHR12R2 для CH2). Розмір даних – півслова (16 біт). DMA працює в циклічному режимі, тому після досягнення кінця таблиці передача повторюється. Кількість передач дорівнює N (32). Адреса таблиці встановлюється як базова адреса масиву. Для подвійного режиму DMA можна використовувати подвійний буфер (double buffer mode), який дозволяє перемикає таблиці без зупинки DMA, що корисно при зміні амплітуди.

3.6.7 Формування синхросигналів для синхронних детекторів

Окрім синусоїдальних сигналів для випромінювачів, необхідно сформувати опорні сигнали (меандри) для синхронних детекторів. Ці сигнали повинні мати ту саму частоту, що й відповідний випромінювач, і бути синхронізованими з ним. Найпростіше сформувати їх за допомогою додаткових каналів тих самих таймерів. Наприклад, TIM2 може генерувати ШІМ на одному каналі для живлення ЦАП (не потрібен, оскільки ЦАП використовує TRGO), а на іншому каналі – меандр з частотою 8,0 кГц і шпаруватістю 50%. Цей меандр подається на ключі синхронних детекторів лівої групи. Аналогічно TIM3 генерує меандр 8,5 кГц для правої групи. Таким чином, всі сигнали синхронізовані від одного таймера, що виключає дрейф фази.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.7 Інтеграція ESP01 з мікроконтролером STM32

У цьому підрозділі наводяться конкретні програмні рішення для реалізації веб-сервера на модулі ESP01 та його взаємодії з мікроконтролером STM32G431 згідно з протоколом, описаним у підрозділі 3.1.6. Розгляд охоплює конфігурацію периферії STM32G431 для роботи з UART та GPIO, реалізацію функцій криптографічного хешування, збереження конфігураційних даних у флеш-пам'яті, а також прошивку ESP01 на базі ESP-IDF з підтримкою HTTP-сервера, обробкою сесій та трансляцією команд. Зовнішній вигляд сторінок наведений на рис. 3.7-рис.3.11



Рисунок 3.7 – Сторінка аутентифікації користувачів

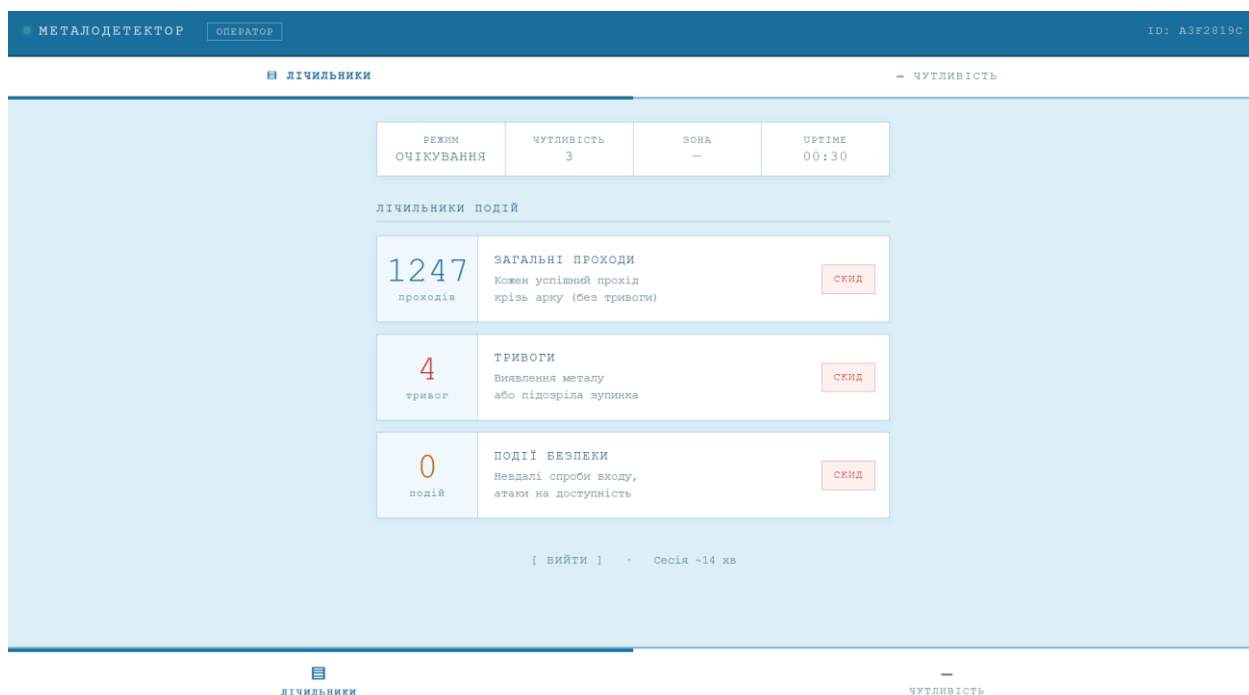


Рисунок 3.8 – Сторінка відображення результатів роботи
металодетектора

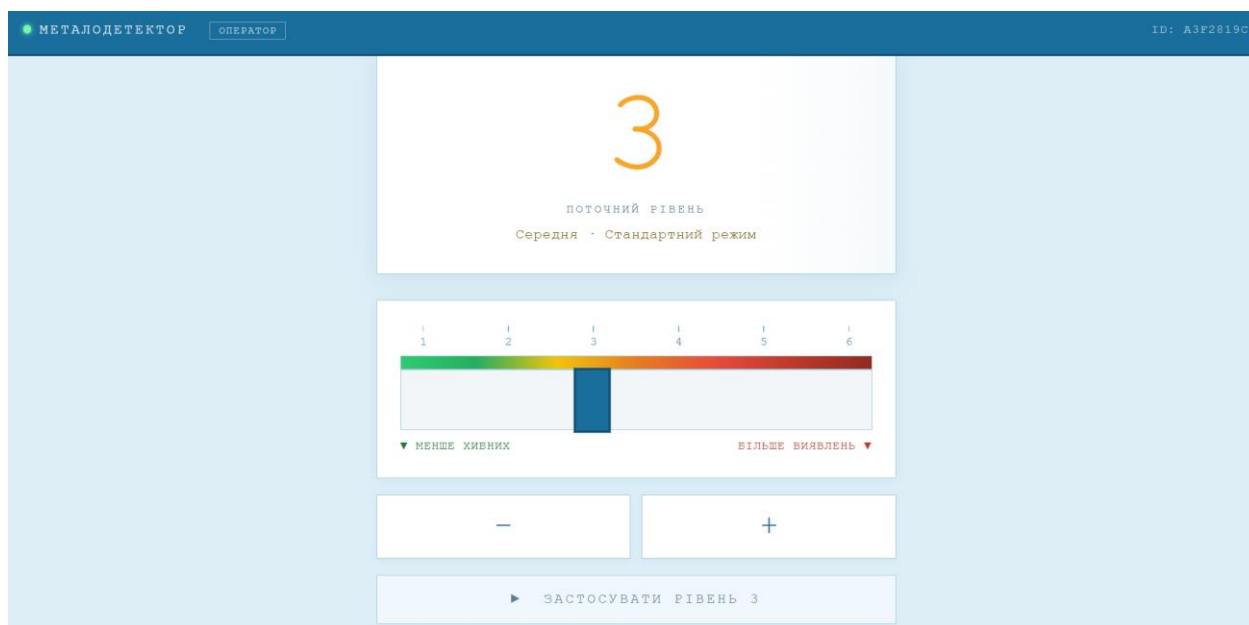


Рисунок 3.9 – Сторінка формування регулятора чутливості металодетектора

ОПИС РІВНІВ		
1	Мінімальна · Великі об'єкти (зброя, великі вузли) Поріг: ~50 мВ · Амплітуда: 50%	
2	Низька · Великі і середні металеві предмети Поріг: ~35 мВ · Амплітуда: 57%	
3	Середня · Стандартний режим Поріг: ~20 мВ · Амплітуда: 65%	
4	Підвищена · Дрібні предмети (ніж, телефон) Поріг: ~12 мВ · Амплітуда: 75%	
5	Висока · Монети, дрібні деталі Поріг: ~6 мВ · Амплітуда: 87%	
6	Максимальна · Мікроелектроніка, фольга Поріг: ~3 мВ · Амплітуда: 100%	
[ВИЙТИ]		

Рисунок 3.10 – Таблиця підказок для регулювання чутливості
металодетектора

ЛІЧИЛЬНИКИ ПОДІЙ

1247

проходів

ЗАГАЛЬНІ ПРОХОДИ

Кожен успішний прохід крізь арку (без тривоги)

СКИД

4

тривог

ТРИВОГИ

Виявлення металу або підозріла зупинка

СКИД

0

подій

ПОДІЇ БЕЗПЕКИ

Невдалі спроби входу, атаки на доступність

СКИД

АДМІНІСТРУВАННЯ

■ СКИНУТИ ВСІ ЛІЧИЛЬНИКИ

◆ ЗМІНИТИ ПАРОЛЬ

[ВИЙТИ] · Сесія ~14 хв

Рисунок 3.11 – Додаткові поля для адміністратора для керування лічильниками

Для обміну даними з ESP01 використовується USART3, оскільки він має окремі виводи TX (PB10) та RX (PB11), не задіяні в інших периферійних функціях. Швидкість передачі встановлюється 115200 бод, 8 біт даних, 1 стоп-біт, без контролю парності. Додатково використовується вивід PA8 як вихід для апаратного скидання ESP01 (підключений до RST модуля).

Прошивка ESP01 розробляється в середовищі ESP-IDF (або Arduino IDE з бібліотекою ESP8266WebServer). Основні компоненти: ініціалізація Wi-Fi в режимі SoftAP, запуск HTTP-сервера, обробка маршрутів, взаємодія з STM32G431 через UART (Serial). Для спрощення розробки використовується клас ESP8266WebServer.

```

cpp
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WebServer.h>

ESP8266WebServer server(80);
String token_cookie = "";
String device_id = "";

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.softAP("MetalDetector_AP", "wifi_pass_123");
    server.on("/", handleLogin);
    server.on("/api/status", handleStatus);
    server.on("/api/setthreshold", handleSetThreshold);
    server.on("/api/resetcounters", handleResetCounters);
    server.on("/api/resetalarm", handleResetAlarm);
    server.on("/api/changepass", handleChangePass);
    server.begin();
}

void handleLogin() {
    // Отримати nonce від STM32, побудувати в HTML
    Serial.println("GETCHALLENGE");
    String nonce = waitResponse();
    String html = "<html><body><form onsubmit='...>...</form><script>...</script></body></html>";
    server.send(200, "text/html", html);
}

```

Коли клієнт надсилає POST-запит, ESP01 витягує токен з cookie, формує рядок команди (наприклад, «TOKEN <token> SETTHRESHOLD 3») і надсилає його в UART. Потім очікує відповідь від STM32G431 (до 500 мс) і повертає її клієнту. Для забезпечення неблокуючого читання використовується тайм-аут.

Оскільки пароль не повинен передаватися у відкритому вигляді, HTML-сторінка містить код, який завантажує бібліотеку crypto-js і обчислює HMAC-SHA256(nonce + password). Отримане значення надсилається у формі. Це стандартний підхід, що реалізується кількома рядками JavaScript.

Основний цикл STM32G431 виконує свою логіку (оптичні сенсори, АЦП, тривоги) незалежно від ESP01. Обробка UART-команд відбувається в перериваннях або в головному циклі з низьким пріоритетом. Для синхронізації доступу до спільних даних (лічильники, поріг) використовуються м'ютексабо критичні секції з вимкненням переривань.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		81

Таким чином, програмна реалізація веб-сервера повністю відповідає алгоритму, описаному в 3.1.6, і забезпечує безпечне віддалене керування металодетектором без дублювання коду або порушення структури розділів.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

Проаналізовано електромагнітні методи виявлення металів та порівняно їх з механічними, акустичними та рентгенівськими засобами. Індукційний метод визначено як оптимальний для громадських місць завдяки радіаційній безпеці, пропускній здатності та низькій вартості. Метали класифіковано за провідністю та магнітною проникністю на феро-, пара- та діамагнетики. Виявлено, що основним обмеженням чутливості є вплив потужного первинного поля збудження. Для розв'язання проблеми використано компенсаційну котушку, яка вмикається у протифазі для балансування системи та виділення слабких сигналів від об'єктів.

Розроблено фізико-математичну модель виявлення, засновану на реєстрації зміни комплексного імпедансу середовища при русі металу крізь зону контролю. Створено принципову схему металодетектора на базі мікроконтролера STM32G431. Реалізовано блок генерації сигналу частотою 8500 Гц із активним фільтром низьких частот 4-го порядку за топологією Саллена-Кея, що забезпечує придушення гармонік на 80 децибел на декаду.

Розроблено вузол синхронного детектора на аналоговому комутаторі 4066 для виділення амплітуди та фази відгуку. Алгоритми обробки включають оцифрування 12-бітним АЦП, накопичення даних через інтегратори та селекцію динамічної складової фільтром руху. Для усунення завад і дрейфу застосовано цифрову фільтрацію та калібрування фону методом ковзного середнього. Система доповнена модулем ESP01 для дистанційного керування через UART та веб-інтерфейс із розподілом прав доступу. Результати роботи є базою для побудови багатозонних стаціонарних систем безпеки

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		83

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Paulter N. G., Jr. Users' Guide for Hand-Held and Walk-Through Metal Detectors / Nicholas G. Paulter, Jr. ; prepared for National Institute of Justice. – Washington, DC : U.S. Department of Justice, 2001. – 75 p. – (NIJ Guide 600–00).
2. Effective Security Screening With Metal Detectors: a basic planning handbook / by Garrett Metal Detectors. – Dallas, TX : Ram Pub. Co., 1990. – 120 p.
3. Metal Detector Handbook for Humanitarian Demining: a book about metal detectors, covering detection procedures in the field, and the testing and evaluation of metal detectors for humanitarian demining / Dieter Guelle [et al.]. – Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2003. – 200 p.
4. Walk-Through Metal Detectors for Use in Concealed Weapon and Contraband Detection : NIJ Standard–0601.02 / Nicholas G. Paulter, Jr. ; prepared for National Institute of Justice. – Washington, DC : U.S. Department of Justice, 2003. – 45 p.
5. Safety assessment of electromagnetic exposure of walk-through metal detectors operating at 6.48 kHz / Y. Li [et al.] // Journal of Radiation Research and Radiation Processing. – 2022. – Vol. 40, No. 5. – 050601.
6. Shull P. J. Nondestructive Evaluation : theory, techniques, and applications / edited by Peter J. Shull. – New York : Marcel Dekker, 2002. – 520 p. – (Mechanical engineering ; 142).
7. Libby H. L. Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods / Hugo L. Libby. – New York : Wiley-Interscience, 1971. – 391 p.
8. Orozco L. Synchronous Detectors Facilitate Precision Low-Level Measurements [Electronic resource] / Luis Orozco // Analog Dialogue. –

2015. – Mode of access: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/synchronous-detectors-facilitate-precision.html>.
9. Sedra A. S. Microelectronic Circuits / Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, Tony Chan Carusone, Vincent Gaudet. – 8th ed. – New York : Oxford University Press, 2020. – 1296 p.
 10. STM32G4 Series advanced Arm®-based 32-bit MCUs : Reference Manual RM0440 [Electronic resource]. – Rev. 4. – Geneva : STMicroelectronics, 2021. – Mode of access: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0440-stm32g4-series-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf.
 11. LM4950 7.5W Mono-BTL or 3.1W Stereo Audio Power Amplifier [Electronic resource] : Data Sheet (Rev. E). – Dallas : Texas Instruments, 2013. – Mode of access: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4950.pdf>.
 12. Колонтаєвський Ю. П. Комп'ютерна електроніка : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 156 с.
 13. Цифрова обробка сигналів в телекомунікаційних системах : підручник / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак ; Вінниц. нац. техн. ун-т. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 232 с.
 14. Основи цифрової обробки сигналів : навч. посібник / І. І. Самборський, С. М. Шолохов, О. В. Юрченко, Б. А. Ніколаєнко. – Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 171 с.
 15. Архітектура комп'ютерів. Частина 3. Мікропроцесорні системи. Ч. 2. Програмування для мікроконтролерів STM32 : навч. посібник / І. А. Клименко, А. В. Каплунов, В. А. Таранюк, В. В. Ткаченко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 196 с.
 16. Schwartz M. Internet of Things with ESP8266 : build amazing Internet of Things projects using the ESP8266 Wi-Fi chip / Marco Schwartz. – Birmingham, UK : Packt Publishing, 2016. – 226 p.

					КРБ.ІСТ-06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		85

Додаток А
Структура проекту для ESP-01

```
ArchDetector/  
├── ArchDetector.ino  
└── data/  
    ├── login.html  
    ├── counters.html  
    └── sensitivity.html
```

Додаток Б
Програма проекту ArchDetector.ino

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WebServer.h>
#include <LittleFS.h>

// Налаштування мережі (Точка доступу)
const char* ssid = "ArchDetector_AP";
const char* password = "admin_password";

ESP8266WebServer server(80);

// Глобальні змінні стану (оновлюються від STM32)
int counterIn = 0;
int counterOut = 0;
int currentSensitivity = 50;

void setup() {
    // ESP-01 використовує GPIO1 (TX) та GPIO3 (RX) для Serial
    // Важливо: не використовуйте Serial.print() для відладки, якщо TX
    // підключений до STM32
    Serial.begin(115200);

    // Ініціалізація файлової системи
    if (!LittleFS.begin()) {
        // В реальному пристрої можна бачити світлодіодом при помилці FS
        return;
    }

    // Налаштування Wi-Fi
    WiFi.mode(WIFI_AP);
    WiFi.softAP(ssid, password);

    // Маршрутизація статичних сторінок
    server.on("/", HTTP_GET, []() { serveFile("/login.html", "text/html"); });
    server.on("/login.html", HTTP_GET, []() { serveFile("/login.html", "text/html"); });
    server.on("/counters.html", HTTP_GET, []() { serveFile("/counters.html",
"text/html"); });
    server.on("/sensitivity.html", HTTP_GET, []() { serveFile("/sensitivity.html",
"text/html"); });

    // REST API ендпоінт для отримання даних на клієнті (AJAX)
    server.on("/api/data", HTTP_GET, []() {
        // Формуємо простий JSON
        char jsonBuffer[128];
        snprintf(jsonBuffer, sizeof(jsonBuffer), "{\"in\":%d, \"out\":%d, \"sens\":%d}",
            counterIn, counterOut, currentSensitivity);
        server.send(200, "application/json", jsonBuffer);
    });
}
```

// Обробка POST-запитів зі сторінки чутливості (якщо потрібно змінювати налаштування)

```
server.on("/api/set_sens", HTTP_POST, []) {  
  if (server.hasArg("val")) {  
    int newSens = server.arg("val").toInt();  
    // Відправляємо команду назад на STM32  
    Serial.printf("SET_S:%d\n", newSens);  
    server.send(200, "text/plain", "OK");  
  } else {  
    server.send(400, "text/plain", "Bad Request");  
  }  
};  
  
server.begin();  
}
```

```
void loop() {  
  server.handleClient();  
  handleUART();  
}
```

// Функція читання файлів з пам'яті

```
void serveFile(const char* path, const char* contentType) {  
  if (LittleFS.exists(path)) {  
    File file = LittleFS.open(path, "r");  
    server.streamFile(file, contentType);  
    file.close();  
  } else {  
    server.send(404, "text/plain", "404: File Not Found");  
  }  
}
```

// Функція неблокуючого читання та парсингу UART

```
void handleUART() {  
  static char buffer[64];  
  static size_t pos = 0;  
  
  while (Serial.available() > 0) {  
    char c = Serial.read();  
  
    if (c == '\n') {  
      buffer[pos] = '\0'; // Завершуємо рядок  
  
      // Парсинг даних  
      if (buffer[0] == 'C' && buffer[1] == ':') {  
        sscanf(buffer, "C:%d,%d", &counterIn, &counterOut);  
      } else if (buffer[0] == 'S' && buffer[1] == ':') {  
        sscanf(buffer, "S:%d", &currentSensitivity);  
      }  
    }  
  }  
}
```

```
    pos = 0; // Скидаємо буфер для наступного повідомлення
} else if (pos < sizeof(buffer) - 1 && c != '\r') {
    buffer[pos++] = c;
}
}
}
```

Додаток В
Файл авторизації: data/login.html

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Вхід - Металодетектор</title>
  <style>
    body { font-family: Arial, sans-serif; background: #f4f4f4; display: flex; justify-
content: center; align-items: center; height: 100vh; margin: 0; }
    .login-box { background: #fff; padding: 30px; border-radius: 8px; box-shadow: 0
4px 8px rgba(0,0,0,0.1); width: 300px; text-align: center; }
    input[type="password"] { width: 90%; padding: 10px; margin: 15px 0; border:
1px solid #ccc; border-radius: 4px; }
    button { background: #0056b3; color: white; border: none; padding: 10px 20px;
border-radius: 4px; cursor: pointer; width: 100%; }
    button:hover { background: #004494; }
    .error { color: red; font-size: 0.9em; display: none; }
  </style>
</head>
<body>
  <div class="login-box">
    <h2>Авторизація</h2>
    <p class="error" id="error_msg">Невірний пароль</p>
    <input type="password" id="pass" placeholder="Введіть пароль (admin)">
    <button onclick="checkPass()">Увійти</button>
  </div>

  <script>
    function checkPass() {
      var pass = document.getElementById('pass').value;
      // Увага!!!: пароль зашитий в клієнті для спрощення.
      if(pass === 'admin') {
        window.location.href = '/counters.html';
      } else {
        document.getElementById('error_msg').style.display = 'block';
      }
    }
  </script>
</body>
</html>
```

Додаток Г
Файл лічильників: data/counters.html

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Лічильники</title>
  <style>
    body { font-family: Arial, sans-serif; background: #eef2f3; margin: 0; padding:
20px; color: #333; }
    .nav { margin-bottom: 20px; }
    .nav a { margin-right: 15px; text-decoration: none; color: #0056b3; font-weight:
bold; }
    .container { display: flex; gap: 20px; justify-content: center; flex-wrap: wrap; }
    .card { background: white; padding: 30px; border-radius: 10px; box-shadow: 0
4px 6px rgba(0,0,0,0.1); text-align: center; width: 200px; }
    .val { font-size: 48px; font-weight: bold; color: #2c3e50; margin: 15px 0; }
    .label { font-size: 18px; color: #7f8c8d; }
  </style>
</head>
<body>
  <div class="nav">
    <a href="/counters.html">Лічильники</a> |
    <a href="/sensitivity.html">Налаштування чутливості</a> |
    <a href="/login.html">Вихід</a>
  </div>

  <h2 style="text-align:center;">Статистика проходів</h2>

  <div class="container">
    <div class="card">
      <div class="label">ВХІД</div>
      <div class="val" id="counter_in">--</div>
    </div>
    <div class="card">
      <div class="label">ВИХІД</div>
      <div class="val" id="counter_out">--</div>
    </div>
  </div>

  <script>
    function updateCounters() {
      fetch('/api/data')
        .then(res => res.json())
        .then(data => {
          document.getElementById('counter_in').innerText = data.in;
          document.getElementById('counter_out').innerText = data.out;
        })
    }
  </script>
```

```
        .catch(err => console.error("Помилка з'єднання"));
    }

    // Опитування сервера кожні 1000 мс (1 секунда)
    setInterval(updateCounters, 1000);
    updateCounters(); // Перший виклик при завантаженні
</script>
</body>
</html>
```

Додаток Д
Файл чутливості: data/sensitivity.html

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Чутливість</title>
  <style>
    body { font-family: Arial, sans-serif; background: #eef2f3; margin: 0; padding:
20px; color: #333; }
    .nav { margin-bottom: 20px; }
    .nav a { margin-right: 15px; text-decoration: none; color: #0056b3; font-weight:
bold; }
    .panel { background: white; padding: 30px; border-radius: 10px; box-shadow: 0
4px 6px rgba(0,0,0,0.1); max-width: 400px; margin: 0 auto; text-align: center; }
    .current { font-size: 24px; margin-bottom: 20px; }
    input[type="range"] { width: 100%; margin: 20px 0; }
    input[type="number"] { width: 80px; padding: 5px; font-size: 18px; text-align:
center; }
    button { background: #27ae60; color: white; border: none; padding: 10px 20px;
font-size: 16px; border-radius: 5px; cursor: pointer; width: 100%; margin-top: 15px; }
    button:hover { background: #219653; }
  </style>
</head>
<body>
  <div class="nav">
    <a href="/counters.html">Лічильники</a> |
    <a href="/sensitivity.html">Налаштування чутливості</a> |
    <a href="/login.html">Вихід</a>
  </div>

  <div class="panel">
    <h2>Регулювання чутливості</h2>
    <div class="current">Поточне значення: <b id="curr_sens">--</b></div>

    <form id="sensForm">
      <input type="range" id="sens_slider" min="0" max="100" value="50"
oninput="document.getElementById('sens_val').value = this.value">
      <br>
      <input type="number" id="sens_val" min="0" max="100" value="50"
oninput="document.getElementById('sens_slider').value = this.value">
      <br>
      <button type="submit">Застосувати</button>
    </form>
    <div id="status" style="margin-top: 10px; color: green; display:
none;">Успішно збережено!</div>
  </div>
```

```
<script>
  // Отримання поточного значення
  function getSensitivity() {
    fetch('/api/data')
      .then(res => res.json())
      .then(data => {
        document.getElementById('curr_sens').innerText = data.sens;
      });
  }

  // Відправка нового значення
  document.getElementById('sensForm').addEventListener('submit', function(e) {
    e.preventDefault(); // Запобігаємо перезавантаженню сторінки
    let newVal = document.getElementById('sens_val').value;

    fetch('/api/set_sens', {
      method: 'POST',
      headers: {
        'Content-Type': 'application/x-www-form-urlencoded',
      },
      body: 'val=' + newVal
    }).then(res => {
      if(res.ok) {
        let statusObj = document.getElementById('status');
        statusObj.style.display = 'block';
        setTimeout(() => statusObj.style.display = 'none', 3000);
        getSensitivity(); // Оновлюємо відображення
      }
    });
  });

  // Оновлюємо дані кожні 2 секунди
  setInterval(getSensitivity, 2000);
  getSensitivity();
</script>
</body>
</html>
```

Бібліографічна довідка

Тема роботи: Розроблення інформаційної системи виявлення металевих предметів для забезпечення безпеки об'єктів громадського користування.

Обсяг бакалаврської роботи 85 сторінок.

Перелік графічного матеріалу:

1. Зміни магнітного поля при наявності металевих тіл
2. Принцип компенсації первинного поля металодетектора котушкою компенсації
3. Виявлення рухомого руху металевих об'єктів при нерухомій системі
4. Структурна схема системи
5. Діаграма станів автомата металодетектора
6. Алгоритм роботи системи
7. Вид вікна сервісної програми керування

Дата закінчення БР

Студент

Володимир ГРИНІШАК