

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
Центр після дипломної освіти
Кафедра Комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

«Дослідження пошукового металодетектора»

Виконав:

студент групи СТЗІАздм-21-1

Сапоцький Ю.А.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 125 «Кібербезпека»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системи технічного захисту
інформації, автоматизація її обробки

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Огар В.І.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

_____ (підпис)

Антіпов І.Є.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Центр після дипломної освіти _____.

Кафедра Комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації .

Рівень вищої освіти другий (магістерський) _____.

Спеціальність 125 Кібербезпека _____.

код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системи технічного захисту інформації, автоматизація її обробки.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КРiСТЗi

Антіпов І.Є. _____

(підпис)

«____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові _____ Сапоцькому Юрію Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження пошукового металодетектора»

затверджена наказом по університету від 06 грудня 2023 р. № 262 Стз

2. Термін подання студентом роботи 7.01.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

Предметом дослідження є:

- аналіз фізичних основ виявлення металів

- взаємодія котушки зі струмом з провідниковими матеріалами

- взаємодія котушки зі струмом з феромагнетиками

- аналіз методів роботи металодетекторів різних типів

- новітні технології детектування в сучасних металодетекторах

- огляд промислових металодетекторів

- вимірювання параметрів електромагнітних випромінювань металодетектора

- виявлення типів металів

- проведення спеціальних перевірок за допомогою металодетектора

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

1. Класифікація металодетекторів

2. Фізичні принципи роботи металодетекторів

3. Принципи побудови металодетекторів різних типів

4. Установка для вимірювання електромагнітних випромінювань металодетекторів

5. Вимірювання електромагнітних випромінювань металодетекторів

6. Дослідження виявлення типів металів

7. Використання металодетекторів при спеціальних перевірках для виявлення технічних каналів витоку інформації і огляду підконтрольних осіб

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри):

1)Класифікація МД.

2)Фізичні основи роботи МД.

3)Взаємодія з феромагнетиками.

4)Принципи побудови МД, частотомірні МД.

5)Метод «Передача – приймання».

6)Котушки МД.

7)Індукційний метод.

8)Імпульсний метод.

9)Багаточастотний метод.

10)Промислові МД.

11)Результати експериментального дослідження електромагнітного поля МД.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів	Примітка
1	Пошук літератури за темою кваліфікаційної роботи	01.09-10.09.2023	Виконано
2.	Написання оглядової частини роботи	11.09-30.11.23	Виконано
3.	Проведення експериментального дослідження	01.12.23-20.12.23	Виконано
4.	Оформлення пояснювальної записки	21.12.23- 10.01.24	Виконано

Дата видачі завдання : 01.09.2023р.

Студент



Сапоцький Юрій Анатолійович

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

доц. Огар В.І

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 88 с., 46 рис., 7 табл., 1 додаток, 14 джерел.

МЕТАЛОДЕТЕКТОРИ, ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ, ПОШУКОВІ КОТУШКИ, ПОБІЧНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ І НАВЕДЕННЯ, ВИМІРЮВАННЯ

Тема роботи: « Дослідження пошукового металодетектора».

Метою магістерської роботи є проведення дослідження металодетектора, призначеного для пошуку закладних пристроїв та інших небезпечних об'єктів у діелектричних та слабопровідних середовищах. Був проведений аналіз взаємодії котушки зі струмом з провідниками та феромагнетиками.

Галузь використання – системи технічного захисту інформації.

Об'єктом магістерської роботи є дослідження металодетекторів, принципи їх дії, структурні схеми різних типів.

Мета магістерської роботи: засвоєння теоретичних знань в галузі спеціальних досліджень для технічного захисту інформації, набуття умінь проводити аналіз сучасних засобів пошуку.

Задача магістерської роботи: проаналізувати принципи дії різних металодетекторів і дослідити конкретний тип – пошукового металодетектора для виявлення закладних пристроїв та інших небезпечних об'єктів.

Метою даної атестаційної роботи є проведення аналізу роботи МД різних видів, їх параметрів та дослідження пошукового металодетектора типу GARRETT.

У роботі описана методика пошуку закладних пристроїв у приміщенні для технічного захисту інформації і правила огляду підконтрольних осіб для виявлення заборонених предметів.

ABSTRACT

Explanatory note of qualification work: 88 p. 46 fig., 7 table., 1 appendix, 14 sources.

METAL DETECTORS, TECHNICAL PROTECTION OF INFORMATION, SEARCH COILS, SIDE ELECTROMAGNETIC RADIATION AND GUIDANCE, MEASUREMENT

The topic of the work is " Study of the Search Metal Detector".

The purpose of the master's thesis is to conduct a study of a metal detector designed for the search of embedded devices and other dangerous objects in dielectric and weakly conductive environments. An analysis of the interaction of the coil with the current with conductors and ferromagnets was carried out.

Field of use – technical information protection systems.

The object of the master's work is the study of metal detectors, their principles of operation, structural diagrams of various types.

The purpose of the master's work: assimilation of theoretical knowledge in the field of special research for technical information protection, acquisition of skills to analyze modern search tools.

The task of the master's thesis: to analyze the principles of operation of various metal detectors and to investigate a specific type - a search metal detector for detecting embedded devices and other dangerous objects.

The purpose of this certification work is to conduct an analysis of the operation of MD of various types, their parameters and research of the GARRETT type search metal detector.

The work describes the method of searching for embedded devices in the premises for the technical protection of information and the rules for inspecting persons under control to identify prohibited items.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ПРИНЦИПИ РОБОТИ МЕТАЛОДЕТЕКТОРІВ	10
1.1 Класифікація типів металодетекторів.....	10
1.2 Фізичні основи роботи металодетекторів	12
1.2.1 Взаємодія котушки металодетектора з провідниковим об’єктом	12
1.2.2 Вибір оптимальної робочої частоти	16
1.2.3 Вплив магнітної проникливості об’єкта.....	18
2 МЕТОДИ ПОБУДОВИ МЕТАЛОДЕТЕКТОРІВ.....	21
2.1 Частотомірні металодетектори	22
2.1.1 Метод металодетектора на биттях.....	22
2.1.2 Метод з фазовою автопідстройкою частоти.....	24
2.1.3 Метод за принципом електронно-лічильного частотоміра	26
2.2 Метод «Передача - приймання».....	27
2.2.1 Схеми різних типів котушок	32
2.2.2 Режими роботи детектора за методом «Передача – приймання».....	35
2.2.3 Система компенсації впливу землі	35
2.3 Індукційний метод	36
2.4 Метод імпульсної індукції	39
2.5 Новітні технології в сучасних металодетекторах	41
2.5.1 Технологія Multi-IQ	41
2.5.2 Технологія VFLEX.....	42
2.5.3 Технологія BBS.....	42
2.5.4 Технологія FBS	42
2.5.5 Технологія MPS	43
2.5.6 Технологія DVT	43
2.5.7 Технологія SETA	43
3 СУЧАСНІ ПРОМИСЛОВІ МЕТАЛОДЕТЕКТОРИ	45

3.1	Ручний металодетектор Garrett SuperScanner V	45
3.2	Детектор фірми Minelab типу Equinox 700.....	46
3.3	Металошукач Nokta Impact.....	48
3.4	Металошукач MD-3028	49
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛОДЕТЕКТОРІВ	51
4.1	Дослідження NIST	51
4.2	Установка для вимірювання параметрів метало детектора.....	55
4.3	Вимірювання магнітних полів металодетектора	56
4.3.1	Залежність рівня напруженості магнітного поля від відстані.....	57
4.4	Дослідження електричного поля металодетектора	58
4.5	Дослідження реакції на метали.....	59
4.6	Глибина виявлення предмету	59
5	МЕТОДИ ПОШУКУ ЗАКЛАДНИХ ПРИСТРОЇВ І ЗАБОРОНЕНИХ ПРЕДМЕТІВ	60
	ВИСНОВКИ	62
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	63
	Додаток А. Комплект графічних матеріалів.....	64

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕП – електричне поле

ЕЛЧ – електронно-лічильний частотомір

ЕМВ – електромагнітне випромінювання

МП – магнітне поле

МД – металодетектор

НЧ – низькі частоти

РЧ – радіочастоти

ВСТУП

Металодетектори (МД) (часто їх називають металошукачами) використовуються в галузі технічного захисту інформації для пошуку закладних пристроїв [1]. МД отримали широке розповсюдження для виявлення провідних об'єктів в непровідному середовищі. В наш час, коли тероризм набув широкого розповсюдження у світі, МД стали нагальним інструментом, який застосовується в аеропортах, морських портах, в судових установах, у в'язницях, посольствах, лікарнях, школах, а також при проведенні культурно-масових заходів, тобто там, де необхідна абсолютна впевненість у виявленні холодної та вогнепальної зброї і де необхідно забезпечити максимальну пропускну здатність великих потоків людей.

МД пристосовані до роботи в різних кліматичних та погодних умовах. При цьому матеріали і конструкція ручного або портативного МД повністю безпечні для здоров'я обстежуваних відвідувачів і обслуговуючого персоналу.

Все це поєднується з простотою і зручністю в застосуванні, а також з наявністю в МД численних додаткових функцій і режимів.

МД повинен селективно виявляти металеві об'єкти, або маючи у складі метал на фоні металевих предметів особистого користування, при цьому не давати хибних тривог при відсутності об'єктів пошуку.

Особливо актуальний пошук неактивованих засобів знімання інформації, що не випромінюють та пасивних засобів знімання інформації, що тільки відбивають зовнішнє опромінення.

1 ПРИНЦИПИ РОБОТИ МЕТАЛОДЕТЕКТОРІВ

1.1. Класифікація типів металодетекторів

Враховуючи величезну кількість існуючих МД, розглянемо більш детально їх класифікацію. На рис. 1.1 наведено класифікацію МД за принципом дії та призначенням.

За принципом дії вони поділяються: на частотомірні, типу «прийом-передача», різновидом яких є індукційні, струмовихрові та імпульсної індукції.

За призначенням, незалежно від принципа дії, МД поділяються на охоронні, військові та пошукові. В свою чергу, охоронні поділяються на стаціонарні, портативні і для перевірки поштової кореспонденції. Військові МД - це в основному міношукачі. Пошукові МД можна поділити на МД підземних комунікацій, які в свою чергу застосовуються для контролю будівельних конструкцій, трубопроводів, кабелів і дротів. З іншого боку пошукові МД бувають: поверхневі, глибинні і підводні. Підводні мають повністю герметичну конструкцію. Всі ці типи пошукових МД використовуються для пошуку кладів, реліквій, чорних та кольорових металів, самородного золота. Стаціонарні металошукачі як правило, це арочні МД.

Портативні МД бувають двох типів: аркові і ручні. Портативні арочні МД призначені для обладнання тимчасових постів контролю на вокзалах, в аеропортах і на стадіонах. Їх функціональна різниця від стаціонарних арочних МД в тому, що вони повинні мати крім основних характеристик (селективність, чутливість, завадостійкість) ще і додаткові: простота монтажу і демонтажу; зручності при транспортуванні; мала вага. Останні параметри повинні забезпечити мобільність обладнання, не знижуючи його надійності. Доглядовий металошукач призначений для огляду людини або багажу, можливе використання і в медицині. Конвеєрний металошукач призначений для виявлення небажаних металевих предметів на конвеєрі. По внутрішній структурі і способу обробки інформації МД поділяються на аналогові і цифрові, програмовані і не програмовані, за видами сигналізації, діагностування, системам живлення.

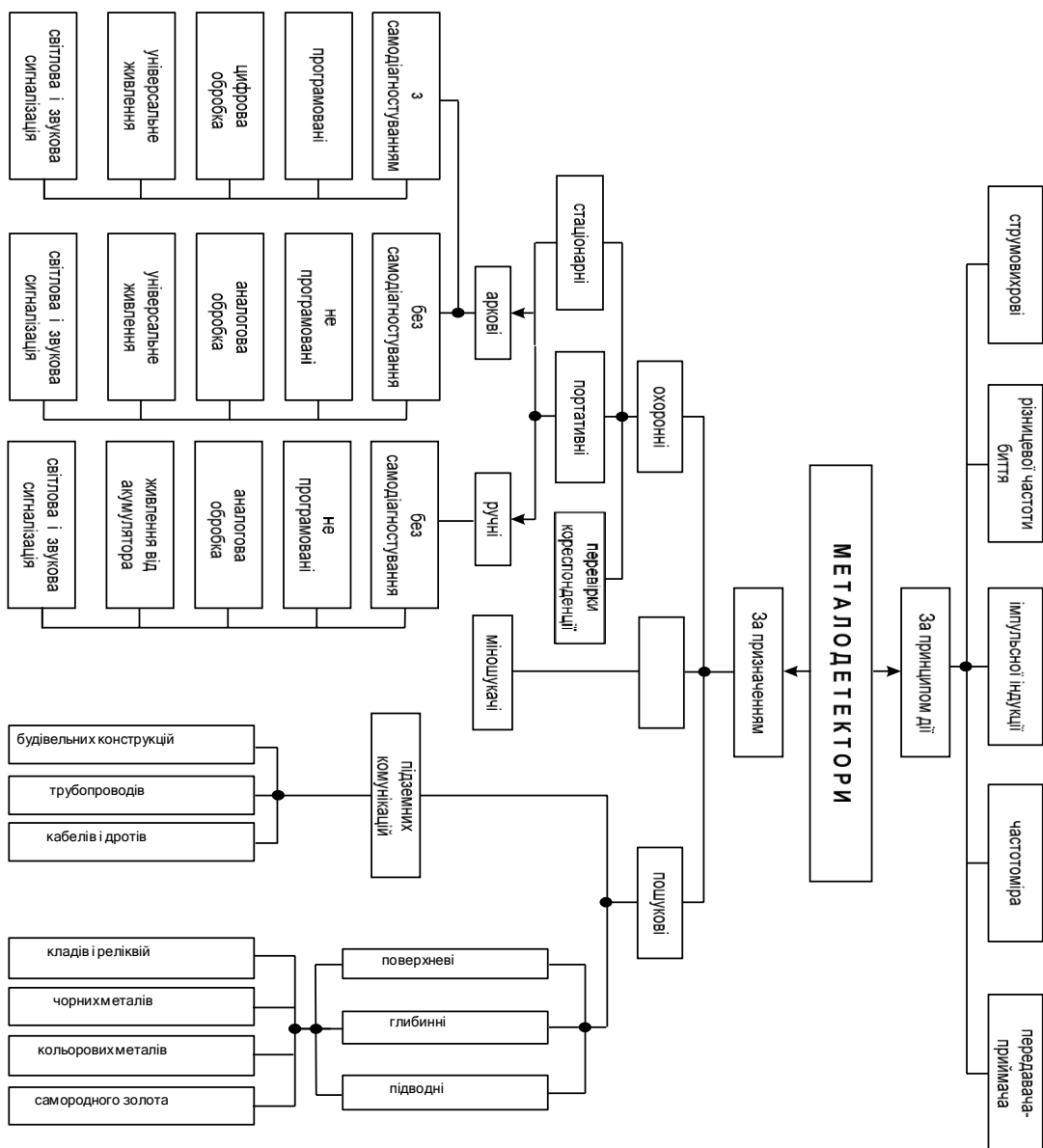


Рисунок 1.1 - Класифікація металодетекторів

1.2. Фізичні основи роботи металодетекторів

В МД прийняття рішення про наявність металу базується на оцінці впливу електропровідності σ та магнітної проникливості μ об'єкта. Значення питомої електропровідності деяких матеріалів в См/метр (Сіменс – одиниця електропровідності $1 \text{ См} = 1/\text{Ом}$) наведено в таблиці 1.1 [11].

Таблиця 1.1 - Значення питомої електропровідності σ

Речовина	Значення електропровідності См / м
срібло	62 500 000
мідь	58 100 000
золото	45 500 000
алюміній	37 000 000
цинк	16 900 000
нікель	11 500 000
залізо чисте	10 000 000
олово	8 330 000
свинець	4 810 000
земля волога	10^{-2}
ферити	10^{-6}

1.2.1 Взаємодія котушки металодетектора з провідниковим об'єктом

Розглянуто взаємодію котушки давача МД з металами - провідниками та феромагнетиками. Розглянемо цю взаємодію більш детально [2,3]. В якості датчиків МД використовуються котушки зі змінним струмом. Якщо поряд з котушкою немає провідного об'єкта, то напруга U_1 і струм I_1 в ній пов'язані рівнянням:

$$U_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (1.1)$$

При синусоїдному струмі в котушці поля, і напруги змінюються по синусоїді з тією ж частотою, тому в комплексному виді в рівнянні (1.1) оператор диференціювання по часу замінюється множенням на коефіцієнт $j\omega$,

де $j=\sqrt{-1}$; $\omega=2\pi f$ - циклічна частота $U_1 = j\omega L_1 I_1$.

Комплексний опір Z власно котушки, навколо якої нема провідників виражається формулою:

$$Z = \frac{U_1}{I_1} = j\omega L_1 \quad (1.2)$$

При протіканні змінного струму i_1 через котушку L_1 , навколо неї створюється змінне магнітне поле з індукцією B_1 і в тілах провідників, що знаходяться поряд, виникають вихрові струми (рис. 1.2). Ці струми створюють власне магнітне поле з індукцією B_2 , направлене назустріч першому, і результуюче поле складається з полів котушки та поля вихрових струмів.

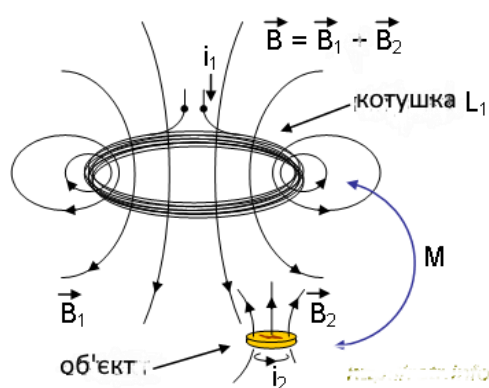


Рисунок 1.2 - Взаємодія магнітних полів котушки і провідникового об'єкта

При наявності магнітного зв'язку з іншою індуктивністю (рис. 1.3), систему катушка – об'єкт можна розглядати як недосконалий трансформатор.



Рисунок 1.3 - Струми взаємоіндукції магнітних полів котушки і металевого об'єкта

Напруги на кожній індуктивності залежать не тільки від струму в ній, але і від струму через другу індуктивність і пов'язані диференціальними рівняннями (1.3), через індуктивність котушки L_1 , індуктивність об'єкта L_2 і взаємодійність M між ними:

$$\begin{cases} U_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ U_2 = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

Або у комплексному виді:

$$\begin{cases} U_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \\ U_2 = j\omega M I_1 + j\omega L_2 I_2 \end{cases} \quad (1.3)$$

Якщо урахувати активний опір об'єкта, який підключений послідовно з індуктивністю L_2 (рис. 1.4), то об'єкт можна розглядати як індуктивний елемент, замкнений на свій активний опір.

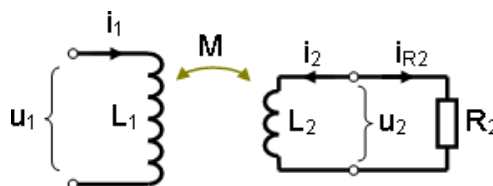


Рисунок 1.4 - Струми і напруги з урахуванням опору металевго об'єкта

Напруга на котушці буде визначатися як сума напруги на індуктивності і напруги на активному опорі об'єкта. Оскільки $U_2 = I_{R2} R_2 = -I_2 R_2$, де напрямки струмів обрані, щоб рівняння для напруг на індуктивностях мали вид (1.3). Підставляємо вираз для U_2 у друге рівняння системи (1.3) і отримуємо:

$$-I_2 R_2 = j\omega M I_1 + j\omega L_2 I_2.$$

Відкіля виражаємо струм в об'єкті I_2 :

$$I_2 = - \frac{j\omega M I_1}{R_2 + j\omega L_2}.$$

Підставивши вираз для струму I_2 в перше рівняння системи (1.3), зможемо виразити U_1 через I_1 :

$$U_1 = \frac{j\omega L_1 I_1 - j\omega M \frac{j\omega M I_1}{R_2 + j\omega L_2}}{R_2 + j\omega L_2} = I_1 \left(j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2} \right).$$

Комплексний опір Z_1 котушки поряд з провідником буде:

$$Z_1 = U_1 / I_1 = j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2}.$$

Щоб виділити дійсну і уявну (активну і реактивну) частину опору, домножимо чисельник і знаменник на $(R_2 - j\omega L_2)$:

$$Z_1 = j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2 \cdot (R_2 - j\omega L_2)}{(R_2 + j\omega L_2) \cdot (R_2 - j\omega L_2)} = j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2 (R_2 - j\omega L_2)}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$$

Тоді маємо:

$$Z_1 = j\omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}.$$

Таким чином, індуктивність котушки порівняно з $Z_1 = j\omega L_1$ в присутності провідника змінюється за рахунок вихрових струмів на ΔL_1 .

$$\Delta L_1 = -\frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}, \text{ тобто індуктивність зменшується.}$$

Відповідно активний опір котушки збільшується на:

$$\Delta R_1 = \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}.$$

Зміна індуктивності і активного опору котушки за рахунок провідності об'єкта, звичайно, залежить від відстані між котушкою і об'єктом, яка впливає через параметр взаємодукції M .

Для виявлення предмета користуються не самою зміною індуктивності котушки, а відносною зміною:

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L_1}{L_1} = -\frac{\omega^2 M^2 L_2}{L_1 (R_2^2 + \omega^2 L_2^2)}. \quad (1.4)$$

Зобразимо вектор зміни комплексного опору котушки (рис. 1.5).

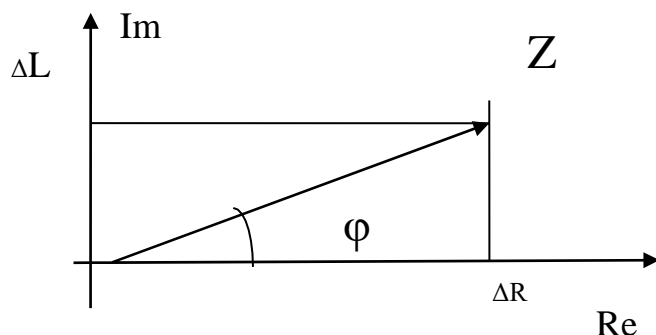


Рисунок 1.5 - Активна і реактивна складові опору котушки в присутності провідника

Зсув фази φ визначається співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta L_1}{\Delta R} = -\frac{L_2}{R_2}.$$

Таким чином, опір котушки відрізняється по модулю і фазі від опору при відсутності об'єкта при тому ж струмі через котушку. Це співвідношення використовується для реалізації функції розрізнення об'єктів за типом метала, з якого вони виготовлені.

1.2.2. Вибір оптимальної робочої частоти

Для вирішення питання про вибір оптимальної частоти, розглянемо, як від частоти залежить відгук котушки на металевий об'єкт. Під відгуком будемо розуміти відносну зміну індуктивності котушки ε_{L1} металошукача за модулем:

$$|\varepsilon_{L1}| = \frac{|\Delta L_1|}{L_1} = \frac{\omega^2 M^2 L_2}{L_1 (R_2^2 + \omega^2 L_2^2)}. \quad (1.5)$$

Частоту вигідно вибрати так, щоб відгук був максимальним. З виразу (1.5) бачимо, що при вкрай низьких частотах відгук прагне до нуля. З ростом частоти відбувається монотонне зростання відгуку, який прагне до граничного значення- $|\varepsilon_{L1}|_{\max} = M_2 / (L_1 L_2)$.

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} (\varepsilon_{L1}) = \left| \frac{\Delta L}{L_1} \right| = \frac{\omega^2 M^2 L}{L_1 (R_2^2 + \omega^2 L_2^2)} = \frac{M^2 L}{L_1 L_2} = \frac{M}{L_1 L_2}.$$

Таким чином, вигідно використовувати досить високі робочі частоти. Практично, відгук можна вважати таким, що досяг граничного значення, коли починає виконуватися умова:

$$\omega^2 L_2^2 \gg R_2^2 \quad (1.6)$$

Подальше збільшення частоти не буде супроводжуватися значущим зростанням чутливості і відгуку. Однак, при дуже високій чутливості, металошукач стає сприйнятливим до впливу ґрунту. Вплив ґрунту, також як і корисного об'єкта, можна уявити як вплив еквівалентного коротко-замкнутого витка зі своїми параметрами L_2, R_2 . Причому, в звичайних умовах R_2 - велика величина навіть для ґрунту, що має високу провідність. Тому вираз (1.5), з урахуванням того, що виконується співвідношення $R_2^2 \gg \omega^2 L_2^2$ прийме вигляд:

$$\varepsilon_{L1} \approx \frac{\omega^2 M^2 L}{L_1 R_2^2}.$$

Звідси випливає, що відгук від ґрунту також швидко зростає зі збільшенням частоти. Тому виявляється вигідним вибрати мінімально можливу робочу частоту. Вона залежить від мінімальних розмірів предметів, які ми зацікавлені виявляти і від питомої провідності металу.

Низькі частоти вигідно використовувати для пошуку на великій глибині. Предмети малих розмірів на великій глибині все одно виявити неможливо, в той час як пошук великих об'єктів на низьких частотах можливий. При цьому, знижуючи до межі робочу частоту, мінімізуємо відгук приладу на ґрунт і, тим самим, забезпечуємо максимальну чутливість приладу і максимальну глибину пошуку.

1.2.3. Вплив магнітної проникливості об'єкта

При протіканні змінного струму через котушку, навколо неї створюється змінне магнітне поле. Якщо в цьому полі знаходиться якась речовина, то навколо неї поле змінюється в залежності від типу речовини. Речовини з точки зору магнітних властивостей поділяються на діа-, пара- і феро- магнетики.

Діамагнетиками називаються такі речовини, у яких магнітний момент атома у відсутності зовнішнього магнітного поля дорівнює нулю. Коли діамагнетик поміщають у магнітне поле, орбіта електрона почне обертатися навколо напрямку поля з деякою кутовою швидкістю. Такий рух називають прецесією. Прецесія орбіти еквівалентна додатковому руху електрона навколо магнітного поля. Це призводить до виникнення замкнутого індукційного струму, що має магнітний момент, орієнтований проти поля та їх намагніченість зменшується. До діамагнетиків відносяться метали Bi, Ag, Au, Cu; вода; скло; інертні гази та ін.

Парамагнетиками називаються речовини, у яких атоми у відсутності зовнішнього магнітного поля мають деякий постійний магнітний момент. Однак, внаслідок теплового руху молекул їх магнітні моменти орієнтовані безладно, тому при накладанні магнітного поля виникають сили, що орієнтують магнітні моменти кожного атома і магнітні моменти вишикуються по полю. Таким чином, парамагнетик намагнічується, створюючи власне магнітне поле, співнаправлене із зовнішнім полем і підсилює його. Процес орієнтації магнітних моментів атомів у зовнішньому магнітному полі називається парамагнітним ефектом. До парамагнетиків відносяться: рідкісноземельні метали, Pt, Al, Mg, Cr, O₂ та ін.

Якщо речовину помістити в магнітне поле струму, то магнітні моменти атомів будуть орієнтовані проти поля в діамагнетиці і по полю в парамагнетиці. Тобто. мікроструми речовини створюють внутрішнє поле, протилежно спрямоване в діамагнетику і співнаправлене в парамагнетику. Тоді вектор магнітної індукції результуючого магнітного поля в речовині дорівнює векторній сумі магнітних індукцій зовнішнього поля і поля мікрострумів. В несильних магнітних полях намагніченість прямо пропорційна напруженості зовнішнього поля $B' = \chi \cdot \mu_0 H$, де χ - безрозмірна величина, звана магнітною сприйнятливістю, яка показує, як

речовина реагує на зовнішнє поле (намагнічується) $\vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H}$. Магнітна проникність показує в скільки разів результуюче магнітне поле в речовині більше зовнішнього поля: $\mu = 1 + \chi$.

Для діамагнетиків: $\chi < 0$; $\mu < 1$; $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$; $B = B_0 - B'$; $\chi \sim 10^{-5} \div 10^{-7}$.

Для парамагнетиків: $\chi > 0$; $\mu > 1$; $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$; $\chi \sim 10^{-3} \div 10^{-5}$.

Феромагнетики — це речовини, атоми, іони, ядра яких мають власні магнітні моменти, спонтанно орієнтовані паралельно один до одного, внаслідок чого утворюються макрообласті (домени) з відмінним від нуля сумарним магнітним моментом. Такі властивості мають деякі метали (залізо, нікель, кобальт, марганець, хром та їхні сплави) з великою магнітною проникністю. Значення відносної магнітної проникливості найбільш розповсюджених матеріалів наведено в табл.1.2.

Таблиця 1.2 - Значення відносної магнітної проникливості матеріалів

Речовина	Значення μ
Пермалой(сплав 80% нікелю і 20% заліза)	8000
Залізо 99,8%	5000
Електротехнічна сталь	4000
Марганець-цинковий ферит	640
Нікель-цинковий ферит	16-640
Сталь	100
Мідь	0,999994
Золото	0,999961
Алюміній	1,000022
Дерево	1,00000043
Повітря	1,00000037
Бетон	1,0
Вода	0,999992

При протіканні змінного струму i_1 через котушку L_1 , навколо неї створюється змінне магнітне поле B_1 . Якщо в цьому полі знаходиться феромагнітний матеріал з

низькою провідністю і високою магнітною проникливістю μ , то навколо нього поле збільшується в μ разів. Індукція магнітного поля об'єкта співпадає по напрямку з індукцією котушки, тому індукція сумарного магнітного поля навколо котушки B збільшується при тому ж струмі через неї. Це еквівалентно збільшенню індуктивності L_1 (рис. 1.6).

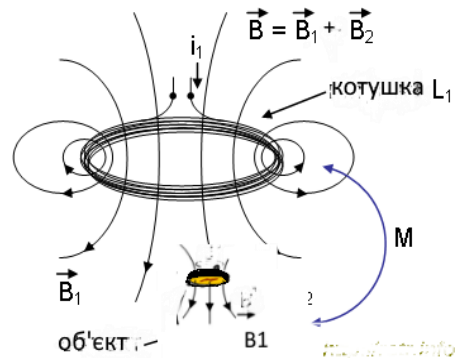


Рисунок 1.6 - Взаємодія магнітних полів котушки і ферромагнітного об'єкта

Завдяки цьому об'єкти з ферромагнітних матеріалів також виявляються по зміні індуктивності котушки-датчика. Причому по знаку зміни індуктивності можна відрізнити ферромагнітні матеріали від провідників, що не є ферромагнітними. Однак, якщо матеріал є і ферромагнітним і провідником (наприклад, залізо і його сплави), то будуть одночасно виявлятися обидва ефекти. Який з них буде переважати, залежить від частоти струму в котушці, від розмірів та форми предмета, від взаємного розташування котушки і об'єкта. Навіть для одного й того ж предмета можлива зміна знака відхилення індуктивності в залежності від умов. Однак на низьких робочих частотах для не дуже масивних предметів переважає ефект збільшення індуктивності.

З вивчення фізичних основ роботи МД можна зробити кілька висновків:

- робота МД базується на оцінці впливу електропровідності та магнітної проникливості матеріалів;
- зміна індуктивності і активного опору котушки за рахунок провідності об'єкта, залежить від відстані між котушкою і об'єктом, що дає можливість МД реалізувати функцію розрізняння об'єктів за типом метала;
- існує залежність пошуку об'єкта від вибору робочої частоти МД.

2 МЕТОДИ ПОБУДОВИ МЕТАЛОДЕТЕКТОРА

Завдання пошуку металевих предметів зводиться до виявлення малих змін індуктивності котушки-датчика, для вирішення якої існує кілька способів. Залежно від обраного рішення, отримаємо один з видів металошукача: частотомірний, приймання – передавання, індукційний, імпульсний.

1. Частотомірні — вимірювачі частоти LC-генератор, при наближенні металу до контуру його частота змінюється. Ця зміна фіксується різними методами:

- за відхиленням частоти генератора від еталонної, яке вимірюється як частота биття;
- за допомогою подачі сигналу з генератора на систему ФАПЧ і вимірювання напруги в колі зворотного зв'язку;
- за цифровим вимірюванням періоду сигналу генератора.

2. «Передача - приймання», що мають дві котушки — приймальна і передавальна, розташовані так, щоб сигнал, який випромінюється передавальною котушкою, не впливав безпосередньо в приймальну котушку. Коли поблизу котушок є металевий предмет, то сигнал передавальної котушки перевипромінюється і потрапляє в приймальну котушку, де посилюється і подається на блок індикації.

3. Індукційні металошукачі- різновид приладів типу «прийом-передача», але мають тільки одну котушку, яка є і передавальною, і приймальною. Основною є виділення малого відбитого (наведеного) сигналу на тлі потужного випромінюваного.

4. Імпульсні, які фіксують відбитий від металу сигнал.

Оглянемо кожний тип МД більш детально.

2.1. Частотомірні металодетектори

2.1.1. Метод металодетектора на биттях

Метод заснований на змішанні коливань двох високочастотних генераторів і виділенні різниці їх частот, що лежить у звуковому діапазоні.

Биттям називається явище, що найпомітніше проявляється при складанні двох періодичних сигналів з близькими частотами і приблизно однаковими амплітудами.

Такі МД працюють на основі визначення малих змін індуктивності пошукової котушки під впливом металевих предметів. Якщо поблизу від пошукової котушки з'являється металевий предмет, змінюється частота сигналу одного з генераторів, а з нею і висота звуку. Принцип їх дії полягає в реєстрації різниці частот від двох генераторів - один має стабільну частоту від кварцевого генератора, а інший містить котушку індуктивності (рис. 2.1).

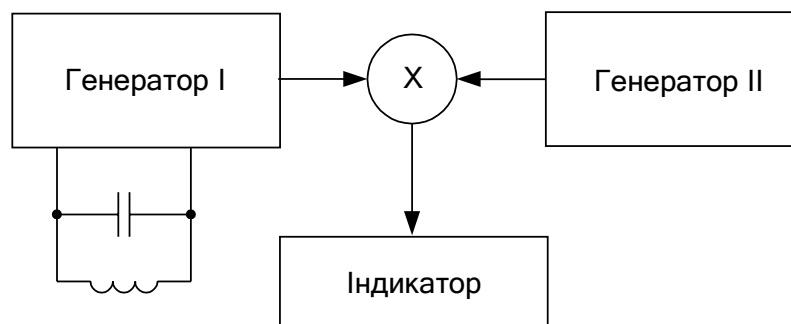


Рисунок 2.1 - Структурна схема МД на биттях

У відсутності металу поблизу датчика частоти двох генераторів дуже близькі за значенням. Наявність металу поблизу котушки призводить до зміни частоти одного генератора. Частота вимірювального генератора $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C}}$

Знайдемо відносну зміну частоти під впливом об'єкта пошуку $\frac{\Delta f}{f}$.

Прологарифмуємо вираз $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C}}$ отримаємо: $\ln(f) = \ln\left(\frac{1}{2\pi}\right) - \frac{1}{2} \ln L - \frac{1}{2} \ln C$.

$$\text{Продиференціюємо: } \frac{df}{f} = -\frac{dL_1}{2L_1} - \frac{dC}{2C}$$

Оскільки ємність контуру $C = \text{const}$, то відносна зміна резонансної частоти контуру:

$$\left| \frac{\Delta f}{f} \right| \approx \frac{\Delta L_1}{2L_1} \approx \frac{\varepsilon_L}{2}$$

Тобто, відносна зміна частоти генератора під впливом об'єктів пошуку приблизно дорівнює половині відносної зміни індуктивності.

Чим вище частота генератора, тим більше буде різниця частот. Реєстрація невеликих відхилень частоти є складною задачею. На слух можна впевнено зареєструвати відхід частоти тонального сигналу не менше 10 Гц. Візуально, за миготінням світлодіода, можна зареєструвати частоти до 1 Гц.

Виділення невеликої за величиною різниці частот двох генераторів породжує проблему захоплення частоти. Два генератори, налаштовані на дуже близькі частоти, мають тенденцію до паразитної взаємної синхронізації. При наближенні різниці частот двох генераторів до нуля, по досягненню різницевої частотою деякого порогу, відбувається стрибкоподібний перехід до збігання частот генераторів. Захоплення фази визивається нелінійностями, присутніми в будь-якому генераторі і паразитним проникненням сигналу одного генератора в інший (по колах живлення, через паразитні ємності, через ґрунт і т.д.). Реально отримати для різницевої частоти поріг синхронізації порядку 10^{-4} від частоти генераторів. Звідси частота МД на биттях від 4 до 100 кГц.

Відгук приладу на металевий об'єкт обернено пропорційний шостому ступеню відстані.

Позитивною для практики стороною МД на биттях є простота конструкції датчика і електронної частини, він компактний, їм зручно користуватися, коли вже виявлено в досліджуваному середовищі предмет більш чутливим, але громіздким МД. Такий прилад може бути дуже компактным.

МД на биттях малого радіусу дії більш точно визначає місцезнаходження предмета.

2.1.2. Метод з фазовою автопідстроювання частоти

Металошукач даного типу працює в режимі нульових частот биттів, наявність металу він фіксує по зміни різності фаз коливань вимірювального і зразкового генераторів, синхронізованих за допомогою петлі фазового автопідстроювання частоти - ФАПЧ. Структурна схема МД з синхронізацією генераторів зображена на рис. 2.2.

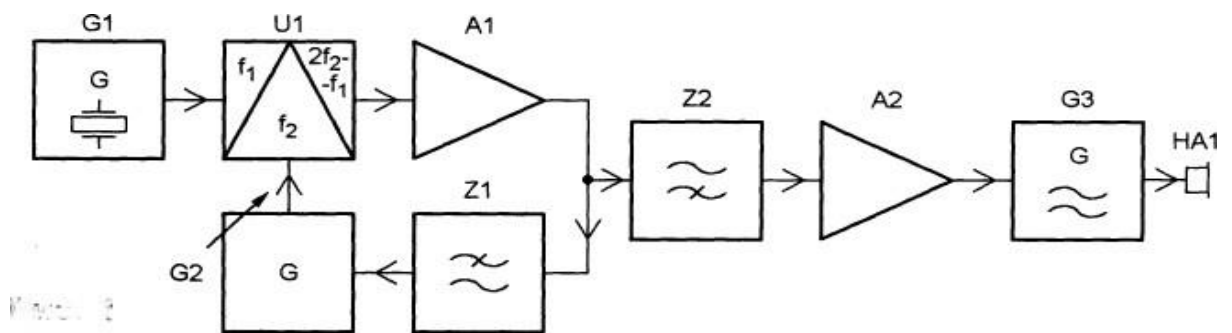


Рисунок 2.2 - Структурна схема МД з синхронізацією генераторів

Сигнали кварцевого зразкового генератора G1 частотою f_1 і вимірювального генератора G2 частотою f_2 надходять на змішувач U1, що служить фазовим детектором системи ФАПЧ. Змішувач працює на другій гармоніці частоти вимірювального генератора, чим значно ослаблений паразитний зв'язок останнього зі зразковим. Вихідний сигнал змішувача через підсилювач постійного струму A1 і фільтр нижніх частот Z1 подаються на вхід управління частотою вимірювального генератора. У режимі захоплення рівність $f_1 = 2f_2$ виконується точно і напруга на виході A1 постійна. Наближення металевого предмета до котушки коливального контуру вимірювального генератора (G2) змінює частоту його вільних коливань f_2 . Однак ФАПЧ підтримує синхронність генераторів, компенсуючи відхід зміною напруги на вході управління частотою генератора.

Змінну складову напруги, що виникає на виході підсилювача, при помаху котушкою - датчиком над металевим предметом виділяє фільтр верхніх частот Z2.

Через підсилювач А2 вона надходить на керуючий вхід генератора звукової частоти G3, поєднаного зі звуковим сигналізатором HA1.

Метод дозволяє відрізнити чорні метали від кольорових.

2.1.3. Метод за принципом електронно-лічильного частотоміра

Принцип дії заснований на вимірюванні за допомогою електронно-лічильного частотоміра (ЕЛЧ) частоти генератора, в контур якого входить котушка індуктивності. При цьому важливе не саме значення частоти, а її зміна, яка виникає при наближенні до об'єкта, і знак цього прирощення [4].

Спочатку електронний частотомір (рис. 2.3) вимірює частоту генератора, коли котушка знаходиться поодаль металевих та феромагнітних матеріалів. Це значення заноситься в реєстр. Потім частотомір вимірює частоту генератора поблизу об'єкта. Різниця значень частот подається на прилад індикації.

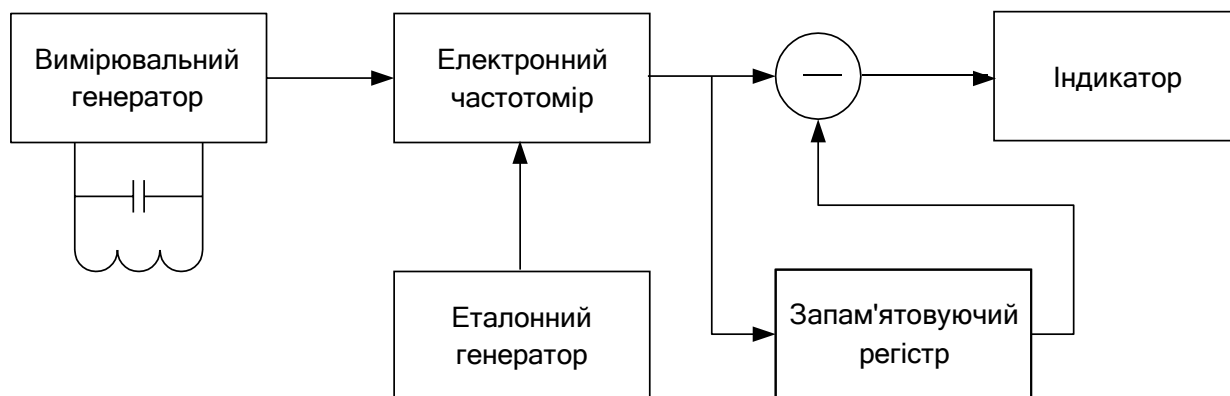


Рисунок 2.3 - Структурна схема МД з вимірюванням частоти ЕЛЧ

Схема МД з вимірюванням частоти ЕЛЧ розроблена на основі мікроконтролера, який виконує всі операції по обробці сигналу і індикації. Частота вимірюється впродовж декількох десятків мікросекунд методом періодомера, тобто заповнення періоду тактовою частотою в декілька мегагерц і підрахунку за допомогою внутрішніх таймерів мікроконтролера.

В залежності від знаку зсуву частоти можливо оцінити тип метала – при збільшенні частоти – кольоровий, при зменшенні – чорний. На жаль, при наближенні до залізного предмета з великою площею на котушку впливають одночасно ефект провідності і феромагнітний ефект.

2.2. Метод «Передача –приймання»

Метод «Передача –приймання» має іншу назву - технологія дуже низької частоти – VLF (very low frequency), також відомий як метод індукційного балансу або індукційні ваги. Технологія VLF - найпоширеніша технологія, яка покладена в основу роботи більшості МД. З моменту винаходу цієї технології інтерпретація результатів значно покращилася, але базовий принцип, який полягає в тому, що МД випромінює сигнал і приймає зворотний відгук, не змінився. Це стандартна технологія виявлення, через достатні характеристики і низьку собівартість.

Принцип роботи такого МД, полягає в тому, що він має передавач і приймач в загальній конструкції, а також дві електричні котушки. Котушка передавача - з мідного дроту, навита кількома витками, по якій проходить електричний струм низької частоти, сталий по амплітуді, що створює змінний магнітний потік в прилеглих металевих предметах і генерує в них вихрові струми. Частота пошуку, може бути тільки одна, наприклад 61кГц або кілька частот (наприклад, 5-10-20 кГц). У деяких сучасних пристроях фірми Minlab, можна одночасно використовувати кілька пошукових частот. Струми створюють вторинне поле, що індуктує сигнал в приймальній котушці. Приймальна котушка розміщена всередині передавальної котушки таким чином, щоб нейтралізувати вплив передавальної котушки у відсутності провідників. При балансі поле навколо прийомної котушки нульове, і на її виході немає електричного сигналу. В дійсності, на виході приймальної котушки є так званий залишковий сигнал, викликаний неідеальністю конструкції.

Металеві предмети, що наближаються до котушки, змінюють конфігурацію поля та індуктивний зв'язок між котушками і розбалансовують систему. В результаті отримуємо на виході котушки сигнал, який далі посилюється. Зміна в фазі і амплітуді напруги на виході приймача показує наявність металевих предметів. Поле від металевого об'єкту буде наводити у приймальній котушці напругу (синій графік рис. 2.4), що має зміни в фазі і амплітуді відносно переданого сигналу (червона лінія) в момент 10, коли котушки проходять над

об'єктом. Фазовий зсув пов'язаний з тим, що провідні матеріали мають властивості опору та індуктивності.

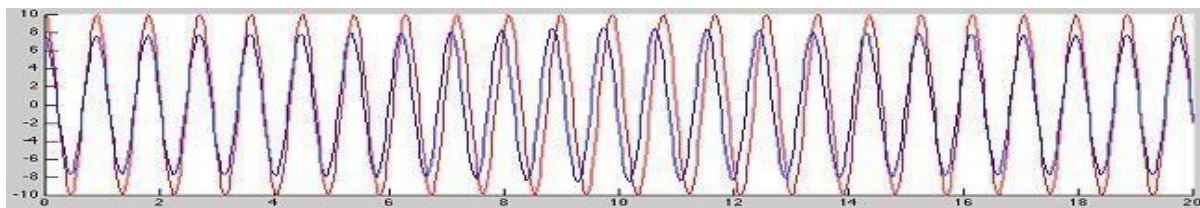


Рисунок 2.4 - Зміна фази відбитого сигналу відносно випроміненого сигналу

Максимальний фазовий зсув буде у об'єктів, які є переважно індуктивними, це великі, товсті предмети, зроблені з гарних провідників, таких як мідь, срібло і золото. Менші фазові зсуви у об'єктів, які мають більший електричний опір, більш тонкі об'єкти та об'єкти з матеріалів з меншою провідністю. Матеріали, які слабо проводять електричний струм, також можуть викликати сильні сигнали на приймачі - це феромагнітні матеріали, які намагнічуються в зовнішніх магнітних полях і сигнал в приймачі матиме мінімальний або нульовий фазовий зсув. Сталь має феромагнітні і електропровідні властивості. Багато ґрунтів містять малі зерна залізних мінералів і детектор буде визначати їх як феромагнітні.

Тип металу об'єкта може бути визначений по відношенню його індуктивності до опору. На частоті передавання цей коефіцієнт може бути обчислений допомогою фазового детектора. Зазвичай використовуються два такі детектори фази з сигналами, зсунутими одна відносно другої на кут 90 градусів - канали X і Y, відповідно, що дозволяють відокремити два компоненти сигналу відклику з об'єкта і визначити найбільш ймовірний тип металу. По відношенню сигналів X та Y каналів можна визначити матеріали від феритів до чистого срібла. Срібна монета дає набагато більше фазовий зсув, ніж алюмінієві гудзики, і детектор так можна настроїти, щоб був звуковий сигнал, або знак на дисплеї, або відхилення стрілки мікроамперметра.

Процес розпізнавання металевих предметів називається дискримінацією. Під дискримінацією розуміється здатність детекторів визначити провідність об'єктів, що знаходяться в ґрунті, і виключати з пошуку предмети з певною провідністю.

Проста дискримінація – основний тип, за такої дискримінації оператор встановлює певний рівень на шкалі провідності. Найпростіша форма дискримінації – це звуковий сигнал, коли котушка проходить над об'єктом, фазовий зсув якого перевищує середнє значення (яке налаштовується). Більш корисна схема — це дискримінатор з виділенням діапазону, коли сигнал з'являється у вказаному діапазоні (наприклад, різноманітні нікелеві монети та кільця), але не реагує на фазовий зсув сигналу вище та нижче діапазону.

Сучасні МД обладнуються мікропроцесорами для обробки сигналів і годографами різних видів (рис. 2.5).

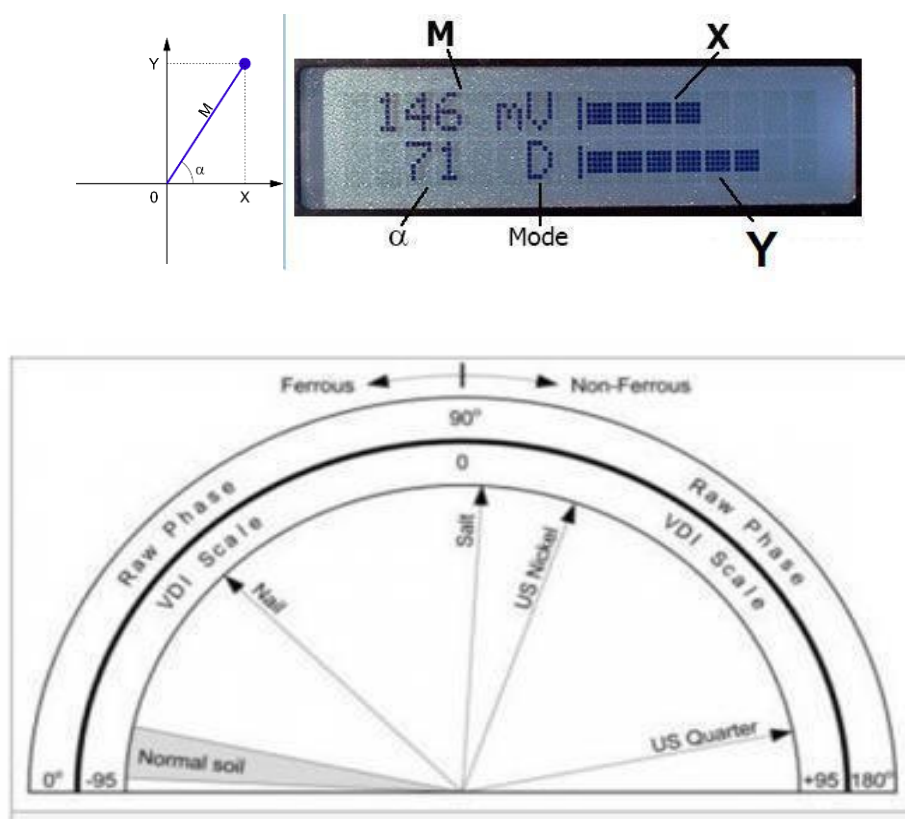


Рисунок 2.5 - Годограф показує модуль M і фазу α коефіцієнта відбиття і тип метала

Амплітуда відклику на металевий об'єкт обернено пропорційно шостому ступені відстані, та такому ж, що й у металошукачах, заснованих на биттях. Однак діапазон виявлення більше через відсутність ефекту паразитної синхронізації.

Частота випромінювання в металодетекторах індукційного балансу визначає глибину виявлення і чутливість. Глибина пошуку визначається скін-ефектом-явищем зменшення амплітуди електромагнітних хвиль при проникненні у провідне

середовище. Високочастотний змінний струм тече не рівномірно, а переважно в поверхневому шарі. Товщина шару визначається затуханням сигналу в $e=2,78$ разів у порівнянні зі струмом на поверхні металу, і розраховується за формулою:

$$\Delta = c \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \rho}{\omega \mu_m}}$$
, де ε_0 —абсолютна діелектрична проникливість, ρ — питомий опір, c — швидкість світла, μ_m — відносна магнітна проникливість, $\omega = 2\pi f$.

Залежність глибини скан-шару від частоти для мідного провідника наведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Залежність глибини скан-шару від частоти для мідного провідника

Частота	Δ
60 Гц	8,57 мм
10 кГц	0,66 мм
100 кГц	0,21 мм
1 МГц	66 мкм

Пошук для низьких частотах може виявляти об'єкти на більшій глибині, але невеликі та неглибокі об'єкти не будуть виявлені. Високі частоти, навпаки, використовується, щоб виявити невеликі об'єкти, але на меншій глибині. Найбільш ефективно використання частот від 2 кГц до 100 кГц. Верхня межа використовується при пошуку біля поверхні і дозволяє виявити малі об'єкти на глибинах до одного метру. МД, що працюють на частотах, недалеко від нижньої границі з достатньою потужністю, виявляють великі об'єкти на глибинах до чотирьох метрів. Ці частоти зазвичай використовується для глибинного пошуку, наприклад кабелів, трубопроводів та інших масивних об'єктів.

Частоти в діапазоні від 6 до 20 кГц добре виявляють метали, і немає проблем з конструкцією котушок. Високі частоти, більше 18 кГц, добре знаходять малі об'єкти, але не в змозі проникнути глибоко в ґрунт, швидко затухають від поверхні. Низька частота 7,5 кГц, навпаки, проникає глибоко, але нечутлива до малих об'єктів. При використанні частот близько 2 кГц добра чутливість до міді та срібла,

але знижена чутливість до золота і нікелю. МД для знаходження золота використовують частоти 15-20 кГц, на цих частотах велика чутливість до маленьких предметів, але мала глибина в товщині ґрунту (стіни).

Здатність детектором металу розрізняти (відрізняти) метали також залежить від частоти. На високих частотах зменшується глибина скін-шару, оксиди на поверхні металу призводять до помилкових рішень, якість дискримінації значно погіршується, особливо при пошуку металевих предметів в вологій землі.

Поліпшити глибину пошуку можливо за допомогою технології з 28 частотами від 1,5 до 100 кГц, яка дозволяє знайти як малі, так і великі цілі. Однак, у випадку складної конфігурації об'єктів можливе їх відсікання. Недоліком цих пристроїв є велика реакція на мінералізовані землі, нечутливість до малих предметів. Для пошуку великих об'єктів об'ємом більше 1л в слабомінералізованому ґрунті ці детектори дуже зручні. МД на основі цього принципу, дають оператору більше інформації відносно конкретної провідності металу і глибини.

Одна з структурних схем реалізації метода «Приймання-передавання» зображена на рис. 2.6. Генератор формує імпульси частотою 32 кГц від кварцевого генератора. Кільцевий лічильник поділяє частоту на 4 і формує два опорних сигнали – меандри з частотою 8 кГц, зсунуті за фазою на 90°. Перший сигнал подається на підсилювач потужності і котушку передавання, де випромінюється у напрямку пошукового об'єкта.

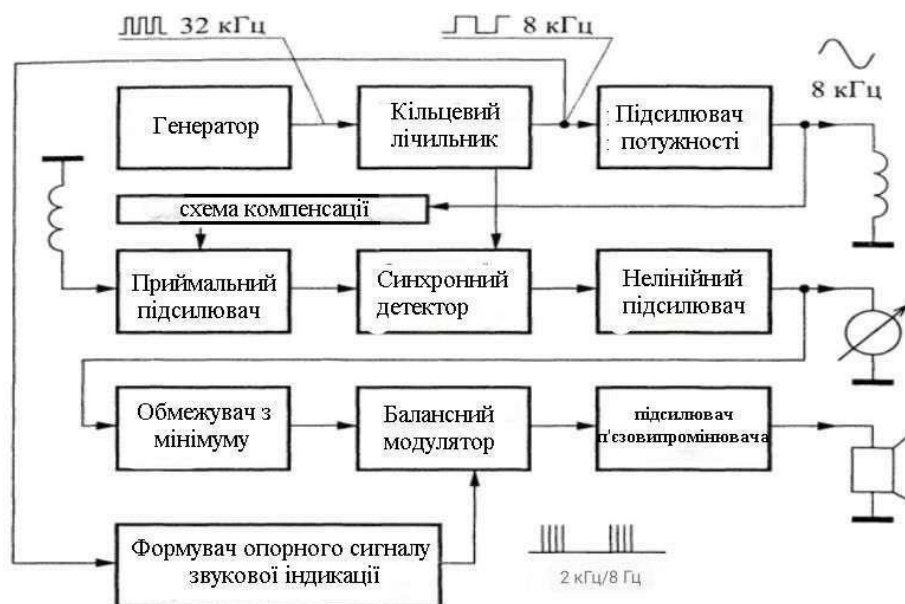


Рисунок 2.6 - Структурна схема МД за принципом «Передача–приймання»

Приймальна котушка приймає відбитий сигнал, який підсилюється приймальним підсилювачем. Коефіцієнт підсилення приймального тракту МД може складати десятки децибел. Підвищення чутливості призводить до погіршення стабільної роботи, перетворюючи металошукач в марний інструмент. Чутливість є важливою, але не основною перевагою сучасних металошукачів.

Підсилений сигнал подається на синхронний детектор, куди також подається другий вихід опорного сигналу. Синхронний детектор має властивість виділення корисного сигналу на тлі фону і завад. Виділений синхронним детектором сигнал через нелінійний (логарифмічний) підсилювач, який зменшує діапазон зміни сигналу, подається на індикатор, що показує рівень і полярність відбитого сигналу. Обмежувач за мінімумом має поріг спрацювання, щоб зменшити ймовірність хибних тривог і далі сигнал подається на формувач сигналу звукової сигналізації.

Для видалення частини переданого сигналу, що безпосередньо надходить від передавальної котушки, використовується схема компенсації.

2.2.1 Схеми різних типів котушок

Схеми котушок, в яких у відсутності металевих предметів на приймальній котушці є мінімальний вхідний сигнал від передавача, показані на рис. 2.7. В цих варіантах показані котушки з перпендикулярними вісями.

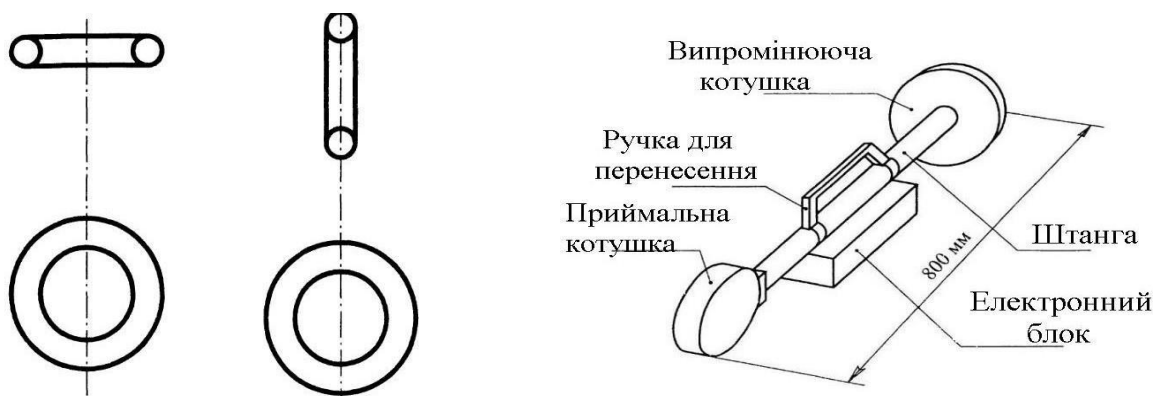


Рисунок 2.7 – Геометрія котушок з перпендикулярними вісями

Найбільш поширені форми котушок – компланарні, коло та еліпс, розташовані в одній площині, зображені на рис. 2.8.

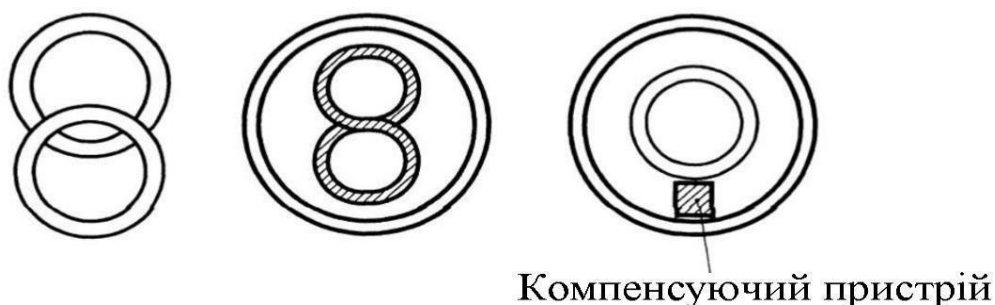


Рисунок 2.8 – Геометрія компланарних котушок

Існує три найбільш поширені типи котушок - котушки концентричного типу, котушки типу Double-D і монокотушки (рис. 2.9). Відмінність між цими котушками полягає в різному розташуванні приймально-передаючих елементів усередині котушок.

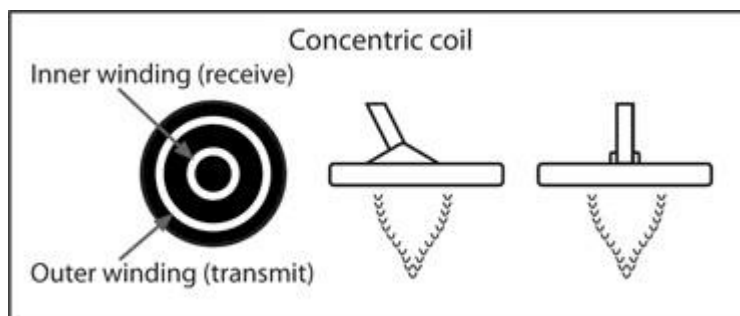


Рисунок 2.9 – Концентричні котушки

Концентричні котушки мають дві «обмотки» - компланарні котушки, одну всередині іншої - приймальна котушка знаходиться всередині передавальної. Діаграма спрямованості такої котушки – конус. Основна перевага такого типу котушок - точне визначення місця розташування об'єкта.

Недоліки концентричних котушок — нестійка робота на ґрунтах з високою мінералізацією та підвищені трудовитрати, необхідні для повного дослідження обраної ділянки в порівнянні з іншими типами котушок.

Котушки типу Double-D (рис. 2.10) мають дві «обмотки» у формі латинської літери D, що перетинаються в центрі котушки. Діаграма спрямованості такої котушки — площина, обмежена діаметром котушки. Цей тип котушок найкращий під час пошуку. Основна перевага таких котушок - рівномірне покриття всієї зони під котушкою і стійкість до мінералізації. Основний недолік - дещо утруднене

точне визначення місця розташування об'єкта, однак він зменшується у міру накопичення досвіду роботи з такими котушками.

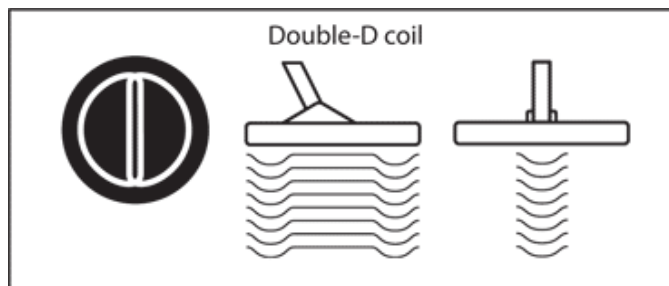


Рисунок 2.10 – Котушки типу Double-D

Конструктивно котушки можуть бути цілісними або відкритими (мати форму павутини). Основний критерій при виборі типу котушки – місце проведення пошуків. Наприклад, еліптичні котушки кращі при пошуку серед каменів або заростей. Відкритими котушками легше працювати у воді.

Пошукова котушка виконується у вигляді тороїда з діаметром 140... 250 мм. Універсальна котушка діаметром 223 мм підходить для більшості умов пошуку. Але універсальна котушка не завжди реалізує можливості МД; іноді необхідно дослідити глибше. Невеликі котушки використовуються при пошуку в стінах, на горищах, підвальних приміщеннях або при сильній мінералізації ґрунту. Чим менше діаметр, тим менше перешкод від залізних виробів. На ділянці, де цілі знаходяться близько (рис. 2.11) з великими, сигнал від монети співпадає з сигналом від цвяхів і може бути проігнорований, тому що МД не може розрізнити дві цілі. Якщо залізна ціль більша за розміром від монети, індикатор чітко вказує на залізо і ціль буде втрачена. При меншому діаметрі котушки менше перешкод, більша глибина виявлення, краща чутливість і орієнтування.

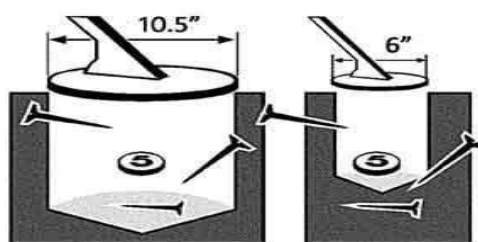


Рисунок 2.11 - Особливості великих та малих пошукових котушок

Пошукові котушки мають мати мінімальну товщину і площу поверхні для переміщення у горизонтальній і вертикальній площині. У деяких моделях МД одночасно зі зміною частоти замінюються відповідні котушки, розроблені і точно збалансовані до певних частот.

2.2.2. Режими роботи детектора за методом «Передача – приймання»

Динамічний режим передбачає безперервний рух пошукової котушки. МД реагує тільки при переміщенні котушки над металом. Якщо зупинити переміщення, то реакція зникає. Динамічний режим вимагає постійного руху і більше зусиль.

Псевдостатичний режим - це динамічний режим з повільним налаштуванням порогу. Якщо котушку довго тримати на об'єкті, реакція зникне.

МД потребує часу на "відновлення", якщо він не встиг "відновитися" після непотрібних предметів, він не зможе реагувати на суміжний цінний предмет.

2.2.3. Система компенсації впливу землі

Оскільки пошук ведеться в землі і стінах, то металеві включення, кераміка, мінерали впливають на глибину пошуку. Для зменшення їх впливу застосовують систему автоматичної настройки компенсації землі AUTOTUNE. Установка балансу ґрунту – це можливість встановити у детекторі певний рівень балансу залежно від типу ґрунту, що дозволяє підтримувати максимальну глибину виявлення. Перевагу металошукача з балансуванням по ґрунту зображено на рис.

2.12. При пошуку без автоматичного налаштування затінені області показують ділянки, які не були належним чином розглянуті. Можна зменшити необстежені ділянки частим ручним балансуванням детектора, що займе багато часу. При роботі з AUTOTUNE - зберігається чутливість й глибина виявлення на всій ділянці.

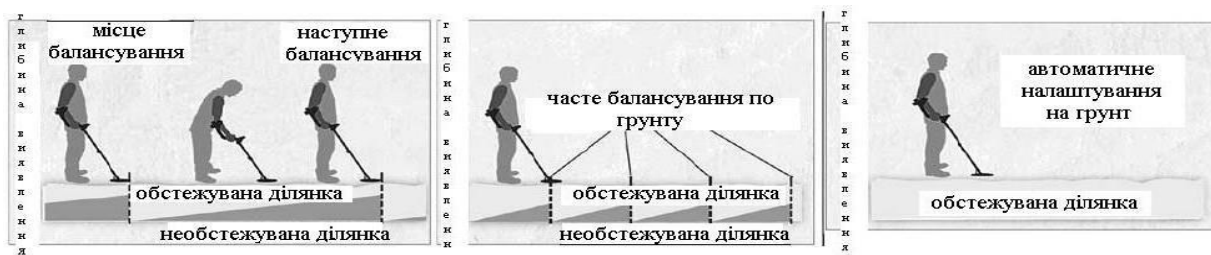


Рисунок 2.12 - Балансування МД

2.3. Індукційний метод

Даний метод є різновидом методу «передавання – приймання», але має тільки одну – монокотушку і схему компенсації прямого сигналу.

Монокотушка має лише одну "обмотку", яка використовується як для прийому, так і для передачі пошукового сигналу. Діаграма спрямованості такої котушки – конус. Основна проблема котушок подібного типу - нестійка робота на ґрунтах з високою мінералізацією та підвищені трудовитрати необхідні для повного дослідження обраної ділянки в порівнянні з котушками Double D.

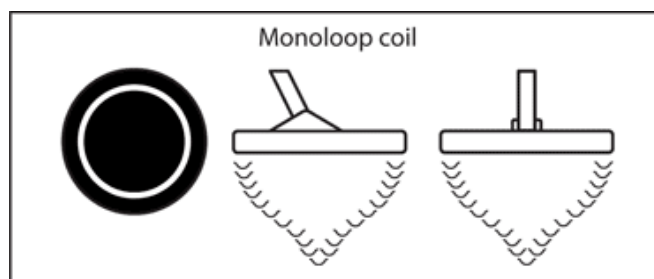


Рисунок 2.13 Моно котушка і її діаграма спрямованості

Принцип роботи МД індукційного методу зображений на рис. 2.14.

Генератор виробляє напругу синусоїдної форми, яка перетворювачем напруга – струм подається на контур з резонансною частотою, яка дорівнює частоті генератора. Суматор виділяє відбитий від об'єкта сигнал.

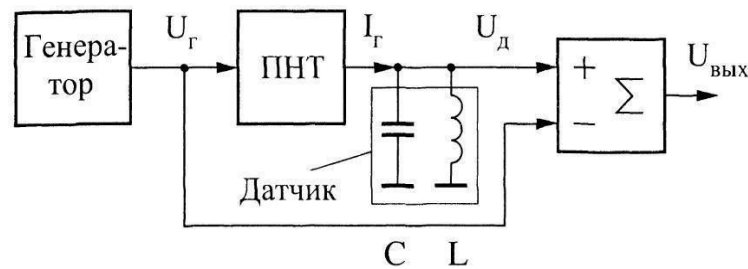


Рисунок 2.14 - Функціональна схема МД індукційного методу

Структурна схема МД однієї з реалізацій індукційного методу зображена на рис. 2.15. Кварцевий генератор формує імпульси частотою 32 кГц. Кільцевий лічильник поділяє частоту на 4 і формує два опорних сигнали – меандри F1 а F2 з частотою 8 кГц, зсунуті за фазою на 90°. Сигнал F1 подається на перший інтегратор, який формує з меандра трикутний сигнал. Другий інтегратор формує з трикутного сигналу параболічний, близький до синусоїдного, який надходить на підсилювач потужності і котушку, де випромінюється в напрямку пошукового об'єкта. Напруга на котушці залежить від характеру цього об'єкта і відбитий сигнал виділяється схемою компенсації. Отриманий таким чином відбитий сигнал після підсилення в приймальному підсилювачі подається на 2 синхронних фазових детектора з опорними сигналами F1 і F2. Вихідні сигнали детекторів є ортогональними компонентами прийнятого сигналу, що дозволяє оцінити тип метала в залежності від фази. Фільтри верхніх частот виділяють змінні складові з частотами вище 10 Гц, пов'язані з рухом котушки відносно об'єктів.

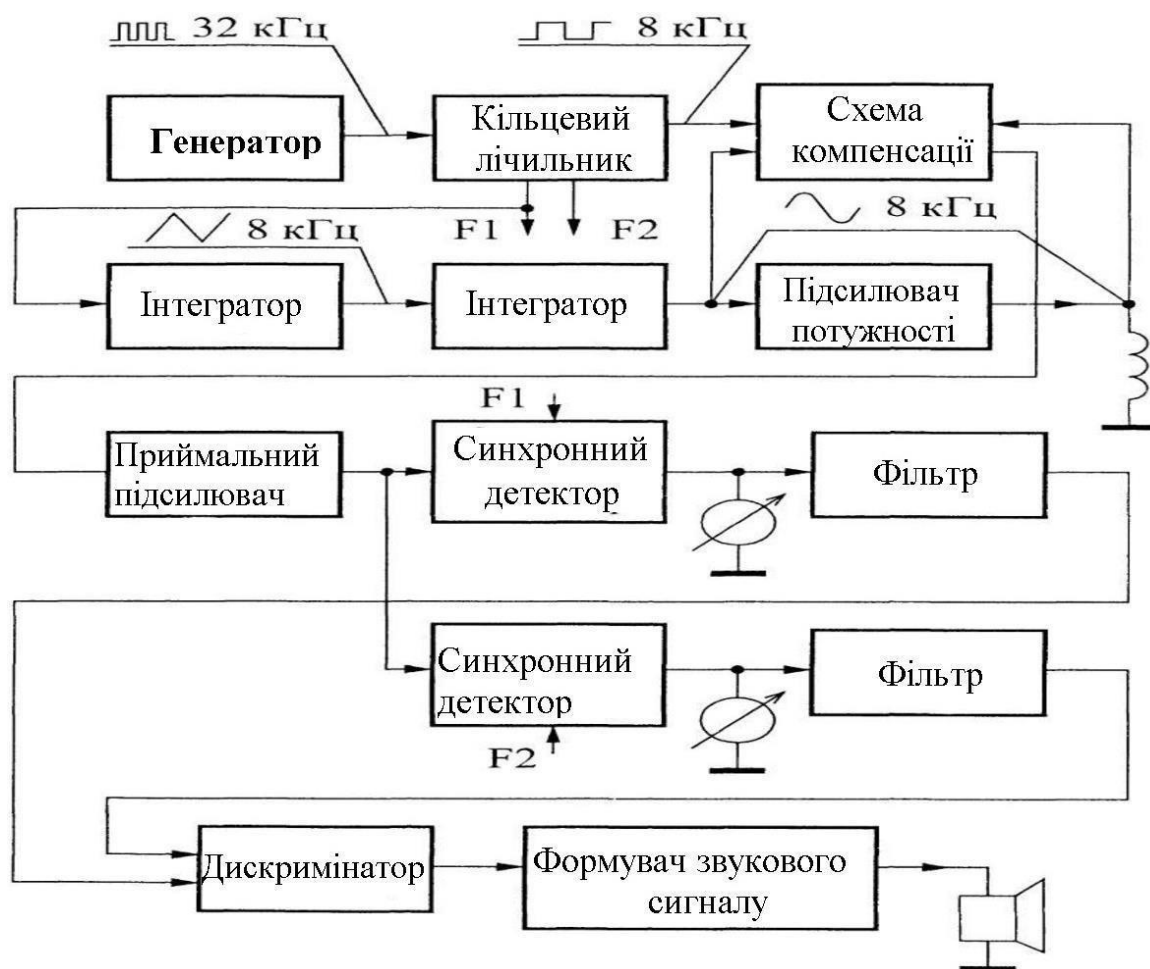


Рисунок 2.15 - Структурна схема МД за індукційним методом

Дискримінація видає сигнал для запуску формувача звукового сигналу тільки при певному співвідношенні сигналів з фазових детекторів. Це дозволяє виключити сигналізацію від м'яких залізних предметів і мінералів.

2.4. Метод імпульсної індукції

В імпульсних МД використовується часовий спосіб виділення відбитих сигналів (рис. 2.16). На передавальну котушку подається послідовність імпульсів частотою 40-200 Гц мілісекундного діапазону тривалості, зі струмом до 20 А і напругою до 200 В. Імпульсне магнітне поле наводить в металевих предметах вихрові струми. Якщо не має металевого об'єкта, задній фронт імпульсу 1 залишається коротким. Якщо поблизу метал, то в замкненому об'єкті відбувається самоіндукція і задній фронт імпульсу сигналу зтягується 2. На основі вимірювання тривалості імпульсу можна виявити металевий предмет.

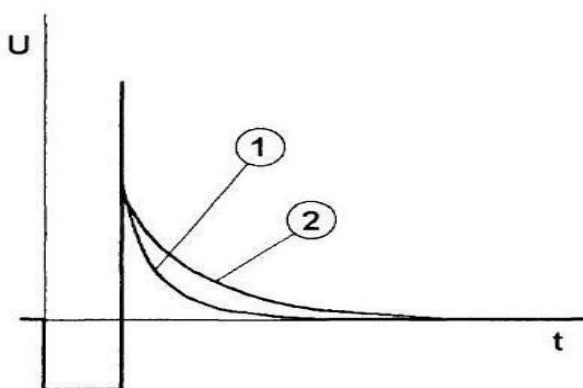


Рисунок 2.16 - Принцип дії імпульсного МД

Приймальна і передавальна котушки в імпульсних МД можуть бути розташовані довільно, оскільки пряме проникнення сигналу в приймальну котушку відбитих сигналів розподілено в часі. Одна котушка може служити приймальною і передавальною, однак у цьому випадку складніше розв'язка високовольтного імпульсного генератора і чутливого входу приймача. Пристрій комутації забезпечує передачу сигналу з приймальної котушки на блок обробки сигналу та блокує вхідні сигнали на тривалість імпульсу в котушці.

Структурна схема реалізації імпульсного МД зображена на рис. 2.17. Роботою схеми керує мікроконтролер (МК). Спочатку МК видає імпульс, який вмикає потужний ключ на польовому транзисторі, що формує імпульс значного струму на пошукову котушку (осцилограма 1 на рис. 2.18). В цей час через котушку протікає пілкоподібний струм (осцилограма 2), а вхід диференційного

відключений. Приймальний підсилювач підсилює задній фронт сигнал корисного імпульсу. Після захисного інтервалу з моменту С відбувається аналого-цифрове перетворення в тривалість імпульсів методом подвійного інтегрування в першому інтеграторі; спочатку він накопичує вхідний сигнал до моменту D, а потім постійну негативну напругу до моменту E.

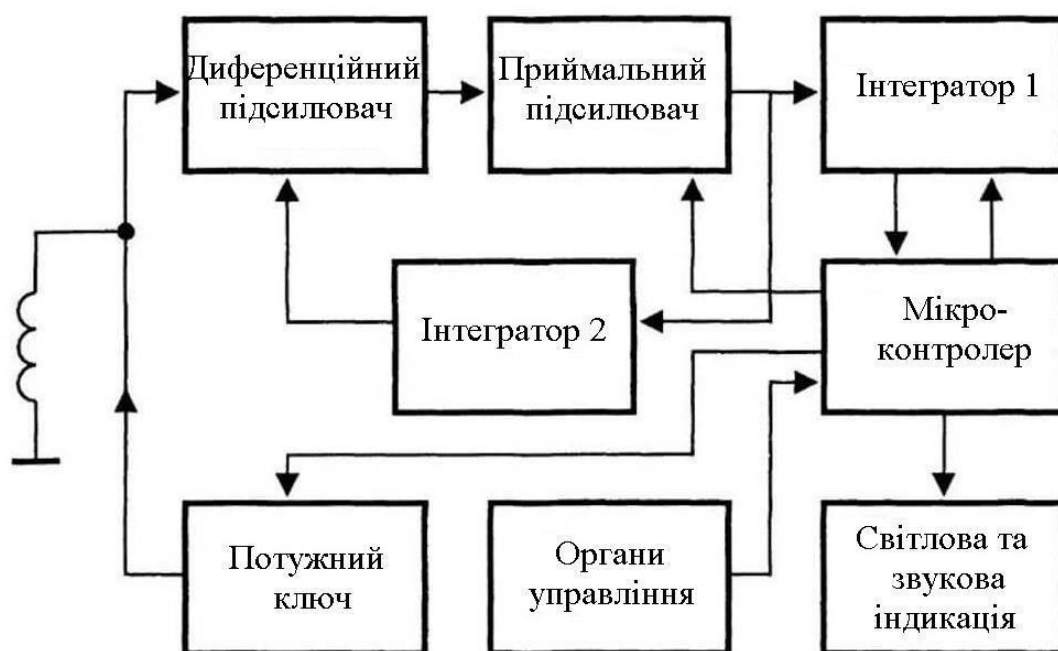


Рисунок 2.17 - Структурна схема імпульсного МД

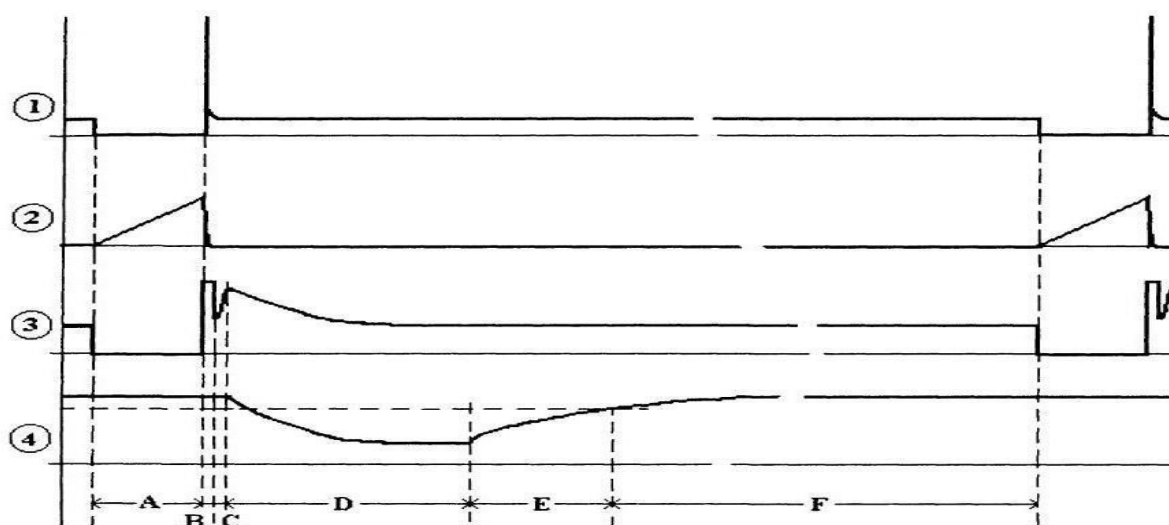


Рисунок 2.18 - Осцилограми в схемі імпульсного МД

Імпульс отриманої тривалості, пропорційний корисному сигналу подається

на вхід МК, де вимірюється його тривалість і виноситься рішення про наявність металу поблизу котушки. Сигнал з виходу МК подається до звукової та світлової індикації на лінійку з 5 світлодіодів, що показують рівень сигналу. Загальна тривалість періоду вимірювань $A+B+C+D+F = 5$ мс. Другий інтегратор має велику постійну часу (0,2 с) і служить для балансування диференційного підсилювача.

Переваги імпульсних МД: найвища чутливість; низька чутливість до землі, простота конструкції котушок. Недоліки: складність генерації і перемикання імпульсу напруги і великого струму, високий рівень радіо завад, велике споживання енергії, потрібні потужні батареї; чутливі до залізних невеликих предметів, складна реалізація дискримінації типу металу.

Кожен принцип має певні переваги і недоліки, так що детектори, які можуть виявляти не тільки наявність, а й тип металу, об'єднують всі три методи. Але МД індуктивного балансу з синусоїдальним сигналом стали стандартним типом МД.

2.5. Новітні технології в сучасних металодетекторах

2.5.1. Технологія Multi-IQ

На наведеній діаграмі (рис 2.19) зображений типовий діапазон чутливості одно частотних детекторів порівняно з чутливістю повного спектра, що забезпечується Multi-IQ. Хоча детектор, що працює на частоті 5 кГц, буде чутливим до провідників з високою провідністю, наприклад, до великих срібних об'єктів, цей же детектор буде особливо нечутливий до маленьких золотих самородків. І навпаки, детектор, що працює на частоті 40 кГц, має високу чутливість до дрібного золота і набагато меншу чутливість до великого срібла. Multi-IQ дуже чутливий до всіх цілей у всьому діапазоні частот.

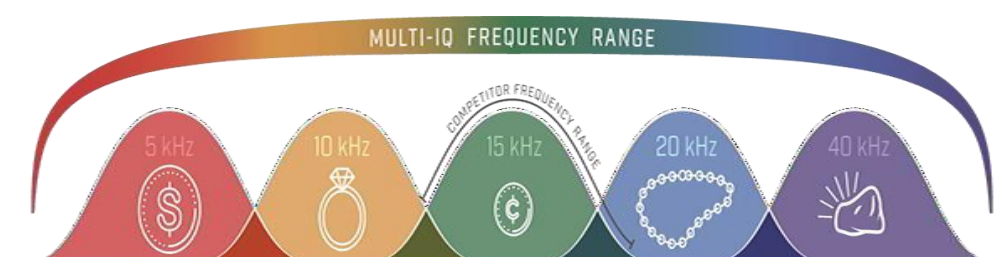


Рисунок 2.19 – Діапазон частот Multi-IQ, показаний на цій діаграмі

2.5.2. Технологія VFLEX

Дана технологія використовує останні досягнення в галузі цифрових технологій для підвищення продуктивності детекторів, які використовують при пошуку одну частоту. Відмінність технології VFLEX полягає в тому, що генератор сигналу знаходиться в блоці котушки детектора. Це дозволяє забезпечити більшу стійкість до зовнішніх перешкод. Також перевагою технології VFLEX є можливість зміни робочої частоти детектора шляхом заміни пошукової котушки.

2.5.3. Технологія BBS

Технологія BBS (Broad Band Spectrum) дослівно перекладається як технологія використання широкої смуги спектра сигналів, що випромінюються. Ця запатентована фірмою Minelab технологія полягає в одночасному використанні при пошуку декількох частот. МД, що працюють за технологією BBS, випромінюють 17 частот від 1,5 кГц до 25,5 кГц. Такий широкий спектр частот дозволяє отримати більше інформації про ціль. Технологія BBS застосовується у Excalibur II.

2.5.4. Технологія FBS

Технологія FBS (Full Band Spectrum) перекладається як технологія використання повної смуги спектра випромінюваних сигналів. Ця технологія полягає в одночасному використанні 28 частот в діапазоні від 1,5 кГц до 100 кГц (рис. 2.20). Такий діапазон випромінюваних частот дає більш точне розпізнавання цілей, збільшення глибини виявлення та чутливості детекторів. Технологія FBS використовується у МД фірми Minelab Explorer, E-TRAC та Safari.

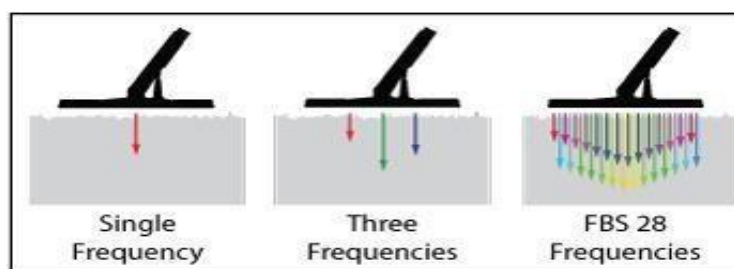


Рисунок 2.20 – Одночасне використання 28 частот

2.5.5. Технологія MPS

Технологія MPS (multi period sensing) - технологія використання зондувальних імпульсів з різними періодами слідування. Технологія MPS – це запатентована Minelab імпульсна індукційна технологія. Стандартна імпульс-індукційна технологія, що використовується в МД, має обмеження, пов'язані з тим, що зондуючі імпульси мають постійну ширину. Технологія MPS використовує зондувальні імпульси різної ширини, що дозволяє отримати додаткову інформацію про мету, досягти кращого балансу ґрунту та збільшити глибину виявлення.

2.5.6. Технологія DVT

Технологія DVT (dual voltage technology), фірми Minelab - технологія використання двох різних напруг, і використовується в детекторах серії GPX. Сенс цієї технології полягає у створенні пошуковою котушкою двох різних рівнів напруги електромагнітного поля, що передається. Це дозволяє покращити баланс ґрунту, підвищити чутливість до малих цілей та збільшити глибину виявлення.

2.5.7. Технологія SETA

Дана технологія є аббревіатурою від Smart Electronic Timing Alignment - розумне електронне вирівнювання зондувальних імпульсів (рис. 2.21). Технологія SETA дозволяє МД, що використовують зондуючі імпульси різного типу, обробляти кожен імпульс незалежно. Це призводить до зниження шумів, підвищення чутливості та глибини виявлення під час усіх імпульсів.

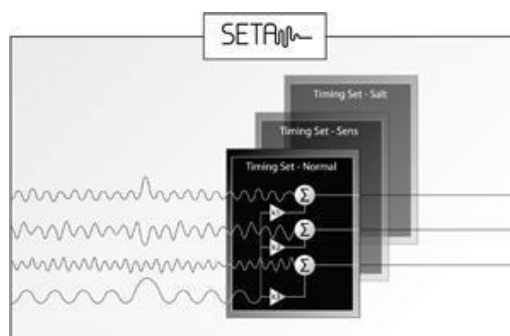


Рисунок 2.21 – Електронне вирівнювання зондувальних імпульсів

Дискримінація з множинними фільтрами передбачає створення оператором певних зон на шкалі дискримінації. Усі цілі, провідність яких не потрапляє у встановлені оператором зони, під час пошуку, ігноруються.

Дискримінація Smartfind™ – унікальний двовимірний тип дискримінації, який графічно відображає на дисплеї інформацію про провідність (відображається аббревіатурою Fe) і розміри (відображається аббревіатурою Co) цілі (рис. 2.22). Дискримінація Smartfind використовується у детекторах E-TRAC та Explorer.

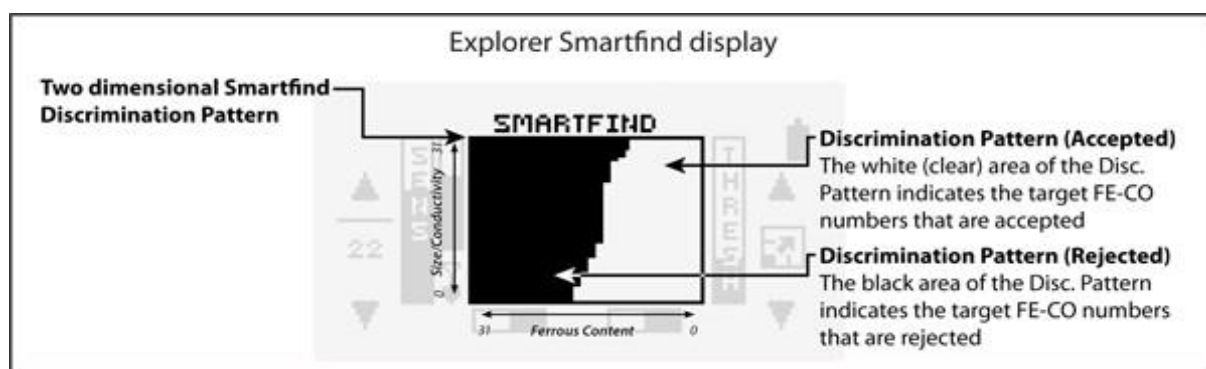


Рисунок 2.22 – Графічне зображення дискримінації

Дискримінація E-TRAC - по горизонтальній вісі відображається розмір цілі від 1 до 50. По вертикальній вісі відображається провідність цілі від 1 до 35 зверху вниз. Низька провідність мети означає низьку кількість заліза, висока провідність мети означає високий вміст заліза. Відповідно, низьке значення розміру цілі означає, що мета має невеликий розмір, високе значення — ціль велика (рис. 2.23).

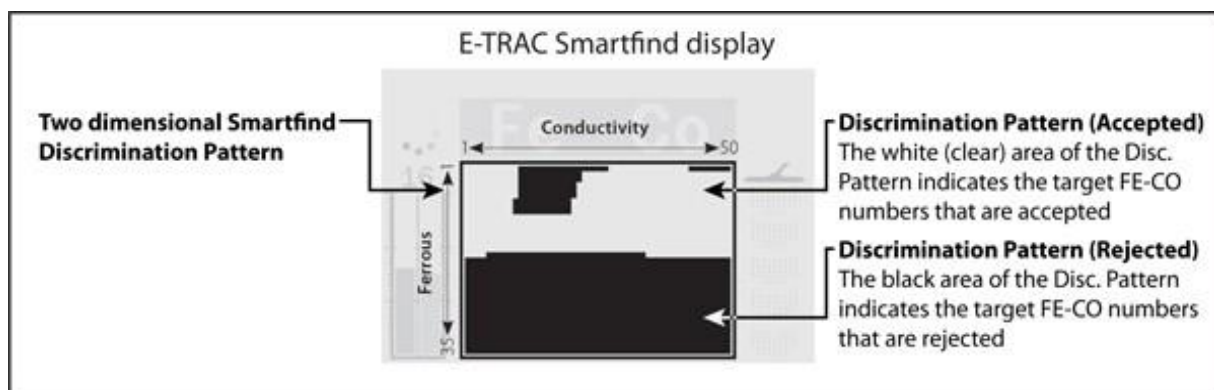


Рисунок 2.23 - Дискримінація Smartfind™.

3 СУЧАСНІ ПРОМИСЛОВІ МЕТАЛОДЕТЕКТОРИ

Сучасний ринок МД представлено багатьма моделями від різних фірм. Більшість з них мають певну класифікацію за принципом пошуку та призначенням.

Найбільш відомими міжнародними компаніями, що виробляють МД, є Garrett, American Fisher, австралійська Minelab, турецька компанія Nokta-Makro, китайські виробники.

3.1. Ручний металодетектор Garrett SuperScanner V

Даний МД (рис. 3.1) спроектований компанією Garrett Metal Detectors США.



Рисунок 3.1 - Ручний МД Garrett SuperScanner V

Призначений для виявлення металевих предметів при огляді людей, багажу і т.п., під час проведення масових заходів і в громадських місцях. Використовується правоохоронними органами, службами безпеки аеропортів, вокзалів, охоронними структурами і т.п. Дуже чутливий і може виявити навіть найменші металеві предмети. Працює на робочій частоті 95 кГц і повністю безпечний в будь-яких ситуаціях, в тому числі при огляді вагітних жінок, і людей зі стимулятором серця. Має автоматичне налаштування чутливості, автоматичний контроль розряду батареї, кнопку оперативного зниження чутливості, роз'єм для підключення навушників, ударостійкий корпус. Розмір: 83x413x42 мм. Максимальна відстань виявлення: пістолет — 22.8 см, ніж — 15.2 см, бритвене лезо — 7.6 см, шпилька — 2.5 см, кишеньковий ніж до 18 см, ювелірний виріб або алюмінієва фольга 2,5 см.

Працює від однієї батареї типу 9В «Крона» близько 100 годин. При виявленні металу повідомляє про це світловим, вібро - або звуковим сигналом тривоги. Виконаний в посиленому корпусі з ударостійкого ABS-пластика. Надійності перевищує вимоги військового стандарту MIL-STD-810 (в частині тесту на падіння). Може виявляти чорні і кольорові метали, включаючи залізо і його сплави. Необхідна робоча чутливість встановлюється перемикачем. Має велику скануючу поверхню. Вага: 500 г. Робоча вологість: до 95%., робоча температура: від мінус-37°С до +70°С

3.2. Детектор фірми Minelab типу Equinox 700

Нова генерація популярного металошукача, який став ще кращим. Minelab Equinox 700 (рис. 3.2) з технологією Multi-IQ, має систему ідентифікації цілей з високою роздільною здатністю (119 значень), гарним поділом цілей та повною водонепроникністю з можливістю занурення до 5 метрів (ступінь захисту IP68).



Рисунок 3.2 - Детектор Equinox 700

Пристрій може працювати в 3 режимах (парк, поле, пляж), кожен з яких відрізняється двома програмованими користувачем профілями пошуку. Технологія Multi-IQ дозволяє одночасно працювати на декількох частотах, забезпечує максимальну чутливість виявлення незалежно від типу та розміру об'єкта, а також мінімізує перешкоди від ґрунту, завдяки чому досягається висока точність

ідентифікації об'єктів на глибинах, що значно перевищують можливості інших одночастотних детекторів.

Технологія Multi-IQ забезпечує високу точність ідентифікації об'єктів на глибинах, що значно перевищують можливості інших одночастотних детекторів.

Чотири частоти дозволяють легко підібрати детектор відповідно до об'єкта, глибини та рельєфу місцевості, що шукається.

Низькі частоти призначені для пошуку більших, глибших об'єктів, таких як військова техніка та великі срібні монети. Високі частоти підходять для менших об'єктів або об'єктів з меншою провідністю, таких як бронзові предмети або ювелірні вироби.

Функція Pinpoint дозволяє визначити точне місцезнаходження знахідки.

ЖК-дисплей та кнопки мають підсвічування для зручного зчитування інформації та роботи в умовах обмеженого освітлення. Крім того, вбудований світлодіодний ліхтарик полегшує пошук в темний час доби. Живлення детектора здійснюється від вбудованого літій-іонного акумулятора ємністю 5100 мАг, що забезпечує до 12 годин роботи. Заряджається батарея за допомогою магнітного кабелю, що входить до комплекту.

Основні можливості детектора:

- режими роботи: "парк", "поле", "пляж";
- робочі частоти: Multi, 4kHz, 5kHz, 10kHz, 15kHz;
- профілі пошуку: 6 режимів;
- чутливість: 25 рівнів;
- гучність: 25 рівнів;
- тональні сигнали: 25 тонів;
- вібраційна сигналізація ручки;
- сегменти дискримінації: 119;
- індикатор глибини: 5 рівнів;
- функція точного визначення місця залягання: Pinpoint;
- заводська котушка: DD 11";
- звук: вбудований динамік, навушники, модуль бездротового аудіо;
- роз'єм для навушників 3,5 мм;- водонепроникність: до 5 м.

3.3. Металошукач Nokta Impact

Металошукач Nokta Impact від компанії Nokta MD (рис. 3.3) - сучасний МД з багатим функціоналом і відмінними пошуковими характеристиками. Розробкою даного МД займалися понад 30 інженерів, а випробування проводили на 5 континентах безліч експертів та користувачів.



Рисунок 3.3 - Металошукач Nokta Impact

Основні можливості металошукача Nokta Impact:

- 12 режимів пошуку, розроблених під різні умови;
- 2 статичні режими;
- 2 режими «Всі метали»;
- 8 режимів дискримінації.

Користувачеві доступні три режими балансування ґрунту: автоматичний, ручний та автовідстеження.

Металошукач може працювати на 3-х частотах: 5 кГц, 14 кГц, 20 кГц.

Такий діапазон дозволяє охопити всі можливі типи пошуку та різноманітні цілі, починаючи від ювелірних знахідок та закінчуючи військовими артефактами.

Враховуючи сучасний підхід, прилад має можливість оновлення прошивки через інтернет, а також такі зручні доповнення: вібрація, ліхтарик, регульоване підсвічування, контрастність дисплея, зміщення частоти, можливість зберігати налаштування.

3.4. Металошукач MD-3028

Металошукач MD-3028 (рис. 3.4). з LCD-дисплеєм є простим в експлуатації, є універсальним пошуковим інструментом, який здатний визначити знаходження в ґрунті різних металевих предметів, у тому числі невеликих розмірів, а також виробів з дорогоцінних та кольорових металів.



Рисунок 3.4 - Металошукач MD-3028

Завдяки високій точності налаштувань допускається налаштування металошукача на певний вид металу. Має 8 ступенів регулювання чутливості. Виготовлений з легких сплавів алюмінію та високоміцного пластику. Може успішно експлуатуватися як початківцями так і досвідченими пошукувачами. Також може бути гарним інструментом у військових цілях, під час перевірки безпеки, археології, пошуку скарбів. Має зручну, регульовану рукоятку.

Особливості:

- автоматичність – можливість виявляти усі види металевих предметів, якщо не встановлені деякі об'єкти, які не хочемо виявляти;
- LCD – зі світлом, що покращує розпізнавання металу в темряві;
- цільова ідентифікація, виявлені об'єкти відображаються на РК-екрані.
- усунення небажаних цілей – є можливість налаштувати детектор так, щоб він не реагував на деякі об'єкти;
- унікальний тон для цілі – не потрібно постійно спостерігати за дисплеєм LCD, коли при виявленні об'єкта генерується унікальний тон, що відповідає цілі;

- відсутність провисання кабелю - прихований кабель, що запобігає заплутуванню та полегшує регулювання довжини стрижня;
- водонепроникна пошукова котушка - дозволяє використовувати детектор на мілководді;
- джерело живлення: батарея 9V*2;
- чутливість > 18 см;
- частота 6.6кНz ± 0.2кНz;
- режими роботи: повністю автоматичний;
- пошукова котушка: котушка 8", водонепроникна;
- індикація - РК дисплей;
- розрізняння метала: чорні та кольорові;
- розмір 55.5*27*13 см;
- вага/блок 1.9 кг.

Висновок до Розділу 3

Сучасний ринок металодетекторів представлено великою кількістю моделей від різних фірм. Вони різняться за типом, функціоналом та вартістю. Застосовуються, як правило, у більшості областей діяльності людини – від промисловості і спецслужб - до археології і пошуку кладів. Але побудова МД і принципи їх роботи більшість фірм їх не розголошують, вважають своєю власністю.

Параметр «Глибини виявлення» - зазначений у рекламних матеріалах, зазвичай передбачений для повітря, але в землі МД може й не знайти предметів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛОДЕТЕКТОРІВ

4.1. Дослідження NIST

З 2000 року Американський інститут стандартів і технологій - NIST проводить [6...10] розробку обладнання для вимірювання характеристик МД, проектування тестових артефактів. Була розроблена система для позиціонування об'єктів відносно МД у декартових координатах. Підібрані матеріали, що імітують електропровідність людських тканин у діапазоні частот МД (від 100Гц до 10МГц). Досліджувались ручні металодетектори (ННМД) та прохідні металодетектори (WTMD) поширені на всіх контрольно-пропускних пунктах. Прокідні МД є основою для перевірки прихованих предметів на людях, знаходять об'єкти, заховані в порожнинах тіла та під шкірою, чого не можуть зробити інші технології. Прокідні МД мають кілька зон виявлення, і разом з відповідними індикаторами використовуються для допомоги у виявленні об'єкта, захованого на людині.

Ручні ННМД мають регульовану чутливість, яку можна налаштувати до рівня, що дозволяє виявляти великі зубні пломби.

Випробувальні артефакти імітують електромагнітні властивості об'єктів загрози та/або контрабанди. На рис. 4.1 зображені моделі загрозливих предметів – пістолета, ключа від наручників, ножа, патрона 22 калібра, які спочатку застосовувались.

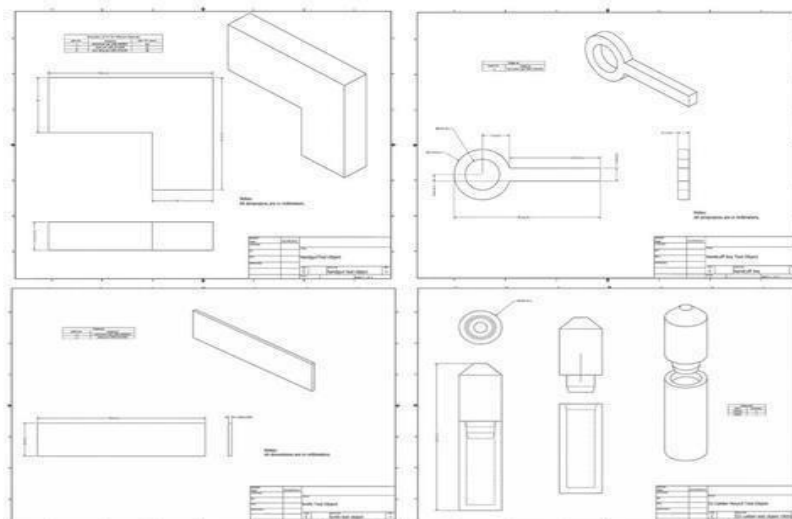


Рисунок 4.1 - Об'єкти випробувань - імітатори загрозливих предметів

Виявлення загрозливих об'єктів сильно залежить від їх розміщення відносно пошукової котушки МД. На рис. 4.2 показані карти виявлення WTMD ножа з нержавіючої сталі в різних орієнтаціях при швидкості сканування 1 м/с.

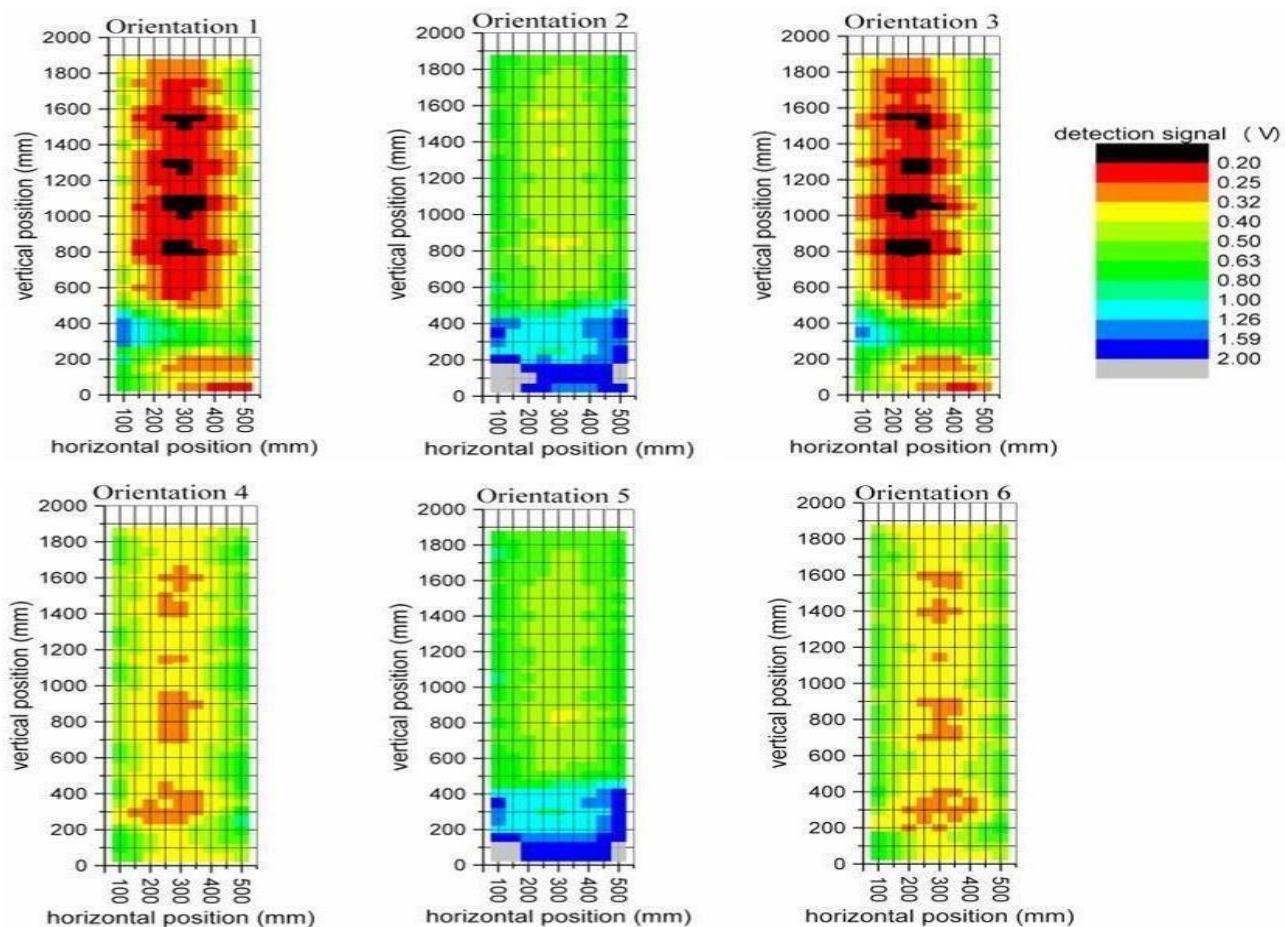


Рисунок 4.2 - Карти виявлення WTMD для ножа з нержавіючої сталі в різних орієнтаціях

На рис. 4.3 зображений графік залежності впливу кута обертання зразка ножа відносно МД на його індуктивний зв'язок із МД: від найменш виявлюваної орієнтації (F), до орієнтації, що найбільш виявляється (E).

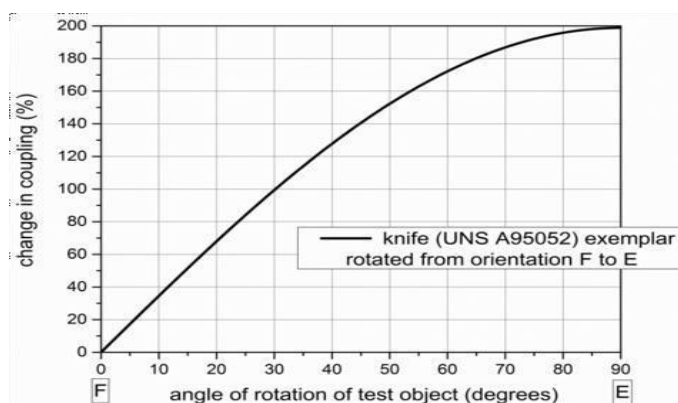


Рисунок 4.3 - Вплив обертання зразка ножа на його виявлення

Проблема з використанням несферичних тестових об'єктів для перевірки ефективності виявлення НВМД полягає в тому, що ефект орієнтації тест-об'єкта може бути значно посилений залежно від конструкції МД. Наприклад, для ННМД виробники спостерігали зміну амплітуди сигналу виявлення в 20-300 разів для різних зразків при порівнянні мінімальної та максимальної орієнтації. Цей ефект орієнтації може призвести до того, що металодетектор буде класифікований як той, що має кращу здатність виявлення, ніж він може забезпечити.

В даний час характеристики МД засновані на видачі тривоги, якщо об'єкт, що перевіряється, підноситься до МД в такій орієнтації, яка робить його найменш виявленим. Якщо МД тестується з використанням тест-об'єкта, обертання якого відхиляється на кілька градусів від орієнтації мінімального виявлення, і МД подає сигнал тривоги, це не означає, що МД виявить цей об'єкт, якщо об'єкт дійсно знаходився в орієнтації мінімального виявлення. Тому було запроваджено використання сферичних тестових об'єктів замість типових абстракцій.

Далі було вивчено вплив електропровідності і магнітної проникності на виявлення феромагнітних об'єктів (рис. 4.4) та кольорових об'єктів (рис. 4.5), де показано зміну індуктивності сталевих і алюмінієвих сфер різного діаметра.

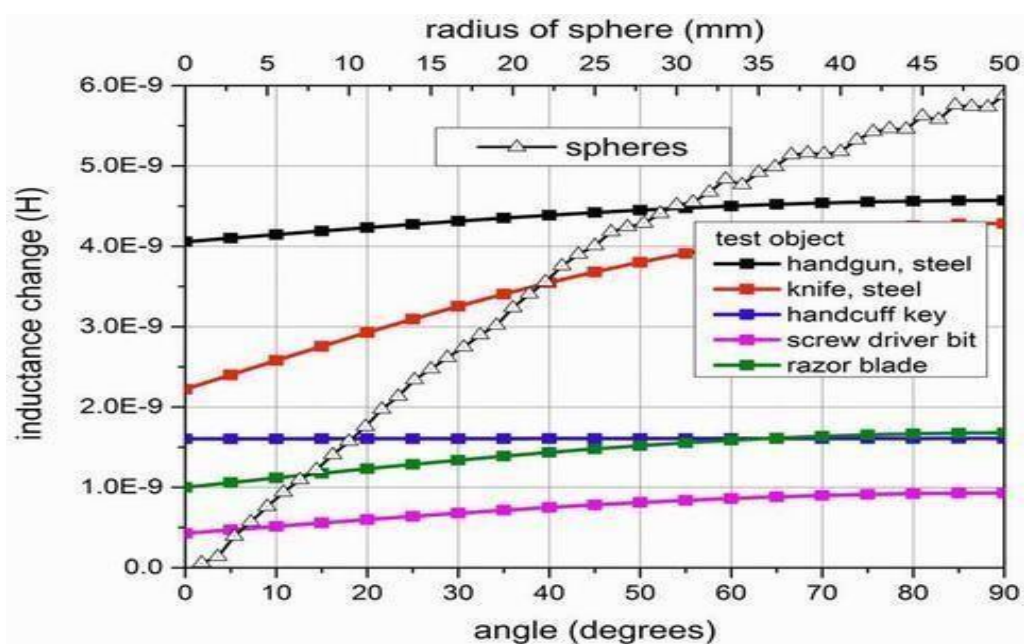


Рисунок 4.4 - Зміна індуктивності котушки для заданих феромагнітних об'єктів контролю при обертанні

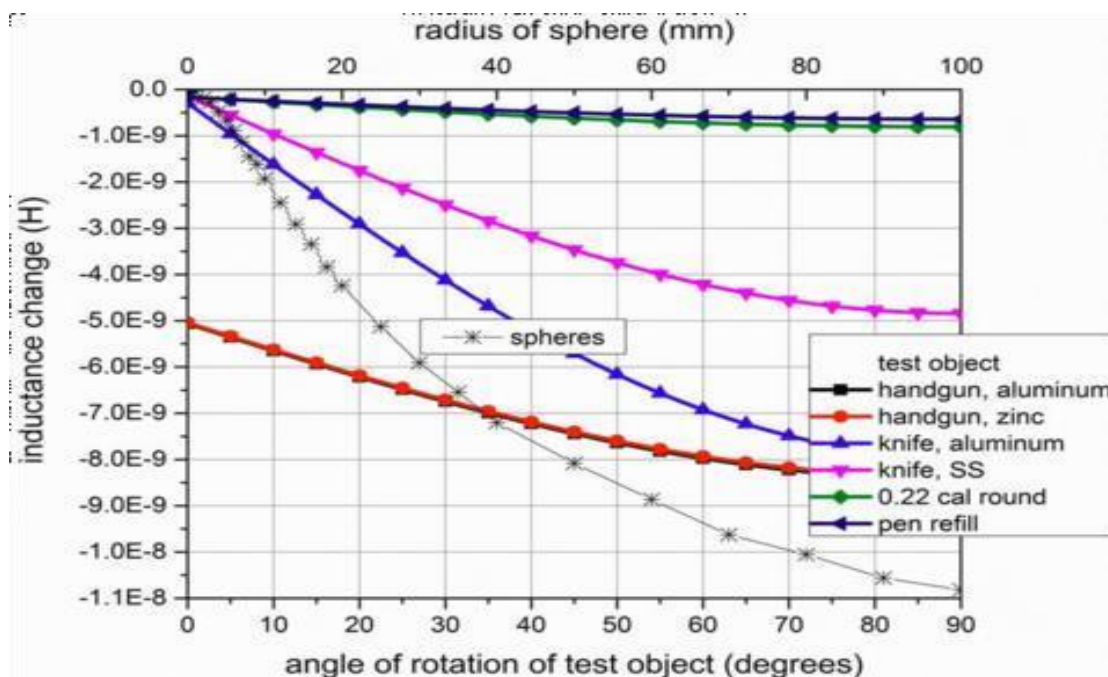


Рисунок 4.5 - Зміна індуктивності котушки для неферромагнітних об'єктів контролю при обертанні

Були виміряні напруженості магнітних полів навколо котушки МД для з'ясування безпеки впливу на здоров'я людини. Вимірювання напруженості магнітного поля проводилися для 8 ручних та 10 прохідних МД. Використовувалися спеціальні зонди магнітного поля, призначені для таких вимірювань. Дані були зібрані в терміналах аеропортів, офісних будинках, а також у середній школі. Прохідні МД мали значно більшу напруженість магнітного поля (до 300А/м), ніж ручні МД (до 5А/м). Частоти сигналу магнітного поля для прохідних детекторів перебували у діапазоні від 0,1 кГц до 3,5 кГц, а для ручних детекторів – у діапазоні від 89 кГц до 133 кГц. Середньоквадратична напруженість магнітного поля порівнювалася з межами впливу на робочому місці та серед населення. Жодна з цих меж не була перевищена.

Форми сигналів усіх ручних МД були синусоїдальними; для прохідних МД були пілкоподібними або імпульсними. Через більш високу напруженість поля та імпульсного характеру магнітних полів прохідні МД, представляють більш високий ризик електромагнітних перешкод медичного обладнання, ніж ручні МД.

4.2. Установка для вимірювання параметрів метало детектора

Для вимірювання напруженості магнітних і електричних полів, поблизу МД типа Garrett SuperScanner V, використовувався вимірювач - аналізатор магнітних та електричних полів типу NARDA EHP-50F (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 - Зовнішній вид вимірювального блоку вимірювача EHP-50F

Електричне або магнітне поле вловлюється трьома антенами-датчиками у вимірювальному блоці на трьох ортогональних осях. Блок цифрової обробки сигналу забезпечує аналого-цифрове перетворення сигналу і спектральний аналіз. Дані з блока вимірювань через оптичний кабель та перетворювач сигналів в USB-формат надходять на персональний комп'ютер (ПК). Результат вимірювань відображався на дисплеї ПК в вигляді спектра та цифрових даних частоти і рівня напруженості полів. Програмне забезпечення NARDA EHP-50F забезпечує можливість копіювання даних з дисплея.

Структурна схема вимірювань індукції магнітних і напруженості електричних полів зображена на рис. 4.7. Зовнішній вид установки для вимірювань показаний на рис. 4.8.

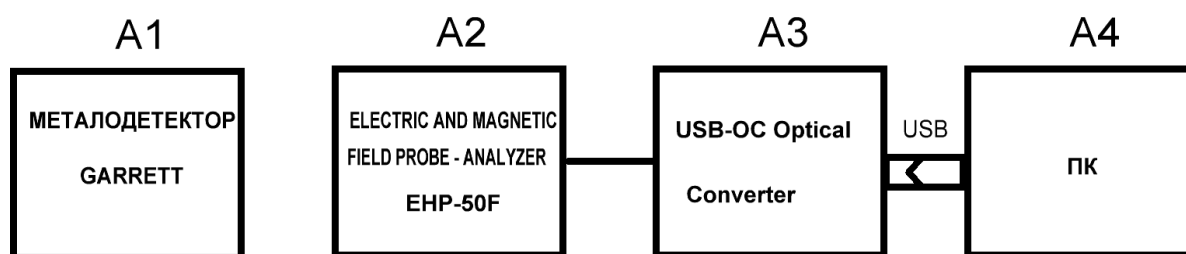


Рисунок 4.7–Структурна схема вимірювань

Метрологічні характеристики аналізатора електричного та магнітного поля EHP-50F наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Метрологічні характеристики ЕНР-50F

Характеристики	Електричне поле	Магнітне поле
Діапазон частот	1Hz ÷ 400kHz	
Діапазон вимірювання	5 mV/m ÷ 1 kV/m	0.3 nT ÷ 100µT
Динамічний діапазон	106dB	110dB
Середній рівень шуму	5mV/m	0.3nT
Невизначеність вимірювань	5%	



Рисунок 4.8 Установка для вимірювань напруженості електричних і магнітних полів

4.3 Вимірювання магнітних полів металодетектора

Спостерігався спектр магнітної індукції сигналу МД за допомогою аналізатора ЕНР-50 в діапазонах частот (1...100) кГц та (4...400) кГц на відстані 10 см. Дані з екрана показані на рис. 4.9 та 4.10.

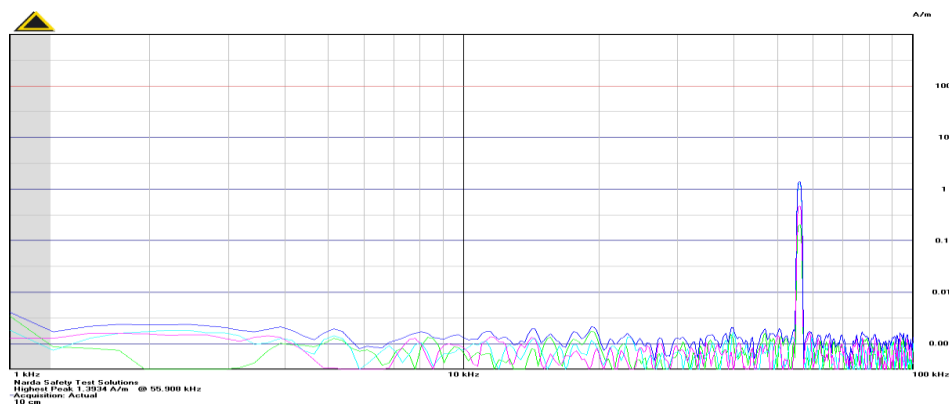


Рисунок 4.9 - Спектр коливань МД в діапазоні частот 1...100 кГц

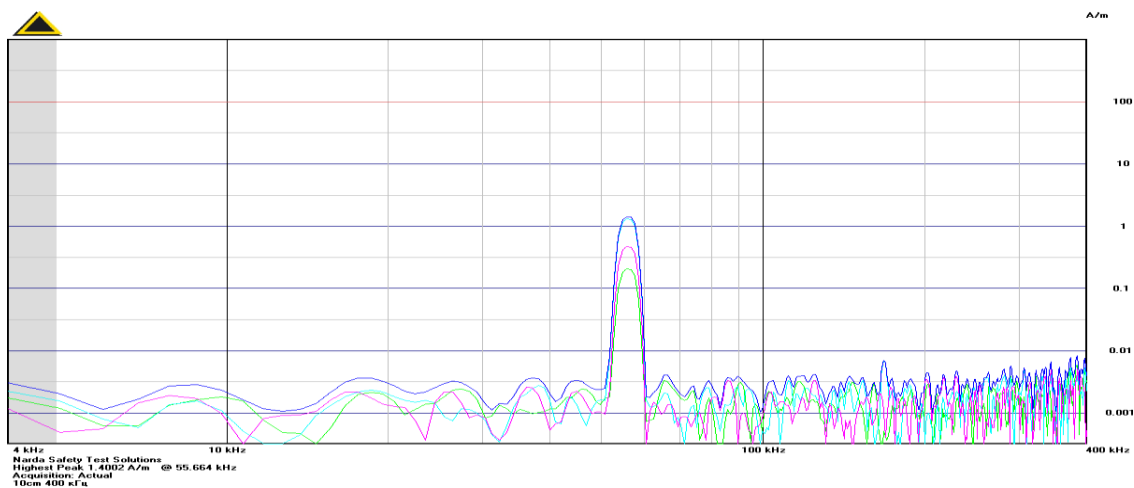


Рисунок 4.10 - Екран аналізатора в діапазоні частот 4...400 кГц

З проведеного експеримента видно, що МД працює на одній частоті 55,654 кГц, з напруженістю поля 1,4А/м на відстані 10 см. Гармонік немає на рівні менше 0,005 А/м, тобто коефіцієнт гармонік не перевищує 0,5%.

Для порівняння дані по напруженості магнітного поля за даними NIST на відстані 2,5 см для ручного МД на частоті 20кГц склали 5 А/м.

4.3.1. Залежність рівня напруженості магнітного поля від відстані

Була виміряна напруженість магнітного поля $H(A/m)$, що випромінюється МД від відстані $L(cm)$, отримані результати зображені в таблиці 4.2 та на рис. 4.11.

Таблиця 4.2 – Залежність напруженості магнітного поля від відстані

L(cm)	60	50	40	30	20	10
H(A/m)	0,002	0,01	0,012	0,04	0,26	1,4

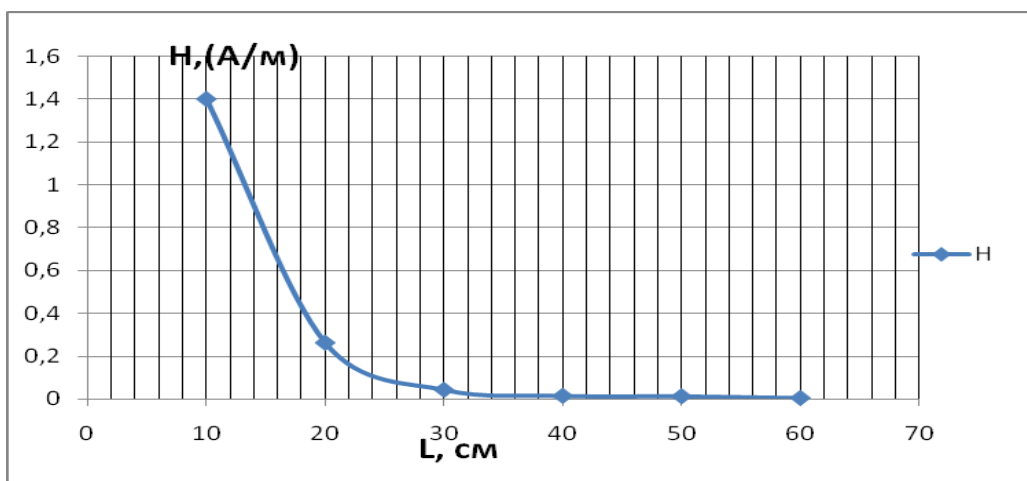


Рисунок 4.11 – Графік залежності напруженості магнітного поля від відстані

4.4. Дослідження електричного поля металодетектора

Була виміряна напруженість електричного поля E (В/м), що випромінюється МД, від відстані L (см), отримані результати наведені в таблиці 4.3 та на рис. 4.12.

Таблиця 4.3 – Залежність напруженості електричного поля від відстані

L(см)	20	15	10	8
E(В/м)	0,01	0,02	0,04	0,05

Для порівняння дані по напруженості електричного поля на відстані 5,5 см для ручного МД на частоті 0,94 кГц за даними NIST склали 15 мВ/м.

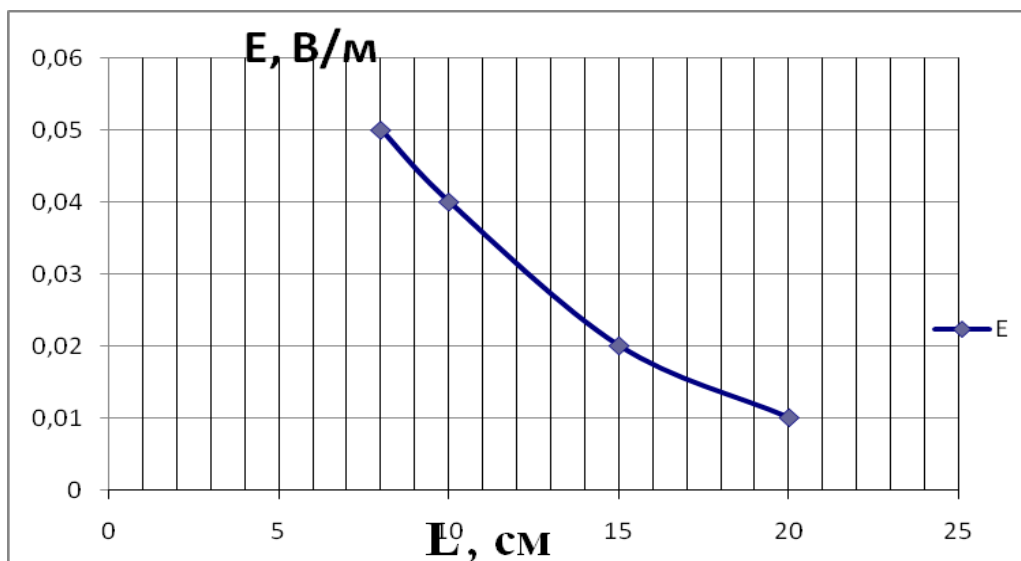


Рисунок 4.12 – Графік залежності напруженості електричного поля від відстані

Функціональну схему установки для визначення форми та частоти сигналу, що випромінюється МД, наведено на рис. 4.13. До установки входять МД, досліджувані матеріали - 2, феритова антена-3, осцилограф типу OWON SDS7102.

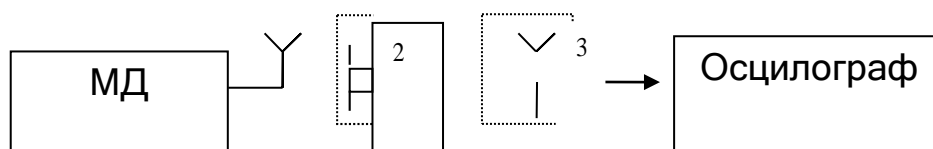


Рисунок 4.13 - Функціональна схема установки для дослідження МД

В результаті вимірювання форма сигналу від МД була синусоїдна з частотою 55,654 кГц.

4.5. Дослідження реакції на метали

Під час проведення дослідження, до рамки МД піднесли зразки з фериту, міді, алюмінію, свинцю, золота, срібла електронної схеми (аналог закладного пристрою), сталі, та спостерігали осцилограми – синусоїда з частотою 55,654кГц не змінювалась.

4.6. Глибина виявлення предмету

Таблиця 4.4 Глибина виявлення предмету МД

Тип металу	Ферит	Електронна схема	сталь	свинець	алюміній
Площа предмету, см ²	10	1	4	2	2
Глибина, см	10	15	5	5	5

5 МЕТОДИКА ПОШУКУ ЗАКЛАДНИХ ПРИСТРОЇВ І ЗАБОРОНЕНИХ ПРЕДМЕТІВ

МД використовуються при проведенні спеціальних перевірок для виявлення прихованих металевих предметів, який включає вихрострумний контроль об'єктів (вузлів) технічних засобів обробки і передачі інформації, що не містять металевих елементів. Оскільки закладні пристрої мають у своєму складі металеві деталі (провідники, елементи корпусу та інше), це дозволяє виявляти і їх за цією ознакою. Особливо актуальний пошук неактивованих засобів знімання інформації, що не випромінюють та пасивних засобів знімання інформації, що тільки відбивають зовнішнє опромінення. МД повинні забезпечувати:

- чутливість по виявленню еталонного зразка металу з відстані 5 см та менше з імовірністю правильного виявлення 0,95 при ймовірності помилкової тривоги 0,05. При цьому габаритні розміри еталона з металу повинні бути не більше 8,0 мм в діаметрі і товщиною 1,0 мм;

- похибка визначення положення металевого впровадження в контрольованому об'єкті не більше 30 см;

- селективність для класифікації виявлених металевих включень в контрольованому об'єкті на чорні і кольорові метали;

- наявність звукової та світлової індикації виявлення металевих включень.

Для пошуку закладних пристроїв розгляньте можливі місця розташування - стіни, меблі, технічні засоби. Методика пошуку закладних пристроїв з використанням ручних металопрошукачів аналогічна пошуку з використанням індикаторів електромагнітного поля. Пошук здійснюється шляхом послідовного обходу приміщення і предметів, що знаходяться в ньому. При цьому котушку МД необхідно поступово переміщати уздовж всієї обстежуваної поверхні або об'єктів на відстані 5...10 см від них. При наближенні котушки до металевого предмету на відстань, яка визначається регулятором чутливості МД і характеристиками виявленого предмета, спрацьовує сигналізація. Слід звертати увагу на наступне:

- в межах двох-трьох метрів від МД не повинно бути великих металевих предметів, в тому числі, щоб уникнути зовнішніх завад, прилад повинен бути віддалений від кабелів живлення і кабелів зв'язку;

- щоб уникнути взаємного впливу кількох МД, вони повинні бути розділені певною відстанню і мати різні діапазони виявлення металу;

- місце пошуку визначає рівень чутливості. Якщо чутливість виявлення встановлена занадто високою, це збільшує ймовірність помилкових тривог, а коли встановлена занадто низькою, це збільшує ймовірність пропуску тривог.

МД може визначати декілька зон, в яких розташовуються об'єкти і дозволяє відокремлювати потенційно небезпечні металеві об'єкти від предметів особистого користування (ланцюжки, годинники, ключі та ін.), забезпечуючи мінімальну кількість помилкових спрацьовувань при високому рівні безпеки і в місцях з високим рівнем електромагнітних завад.

Використання МД підвищує ефективність та оперативність огляду для пошуку заборонених предметів, поліпшує його якість [11]. Звуковий сигнал під час огляду переконує перевіряючого щодо його дій і ставить підконтрольну особу перед необхідністю пред'явити предмет, схований від контролю. У цьому разі звуковий сигнал усуває зайву втрату часу на вмовляння підконтрольної особи пред'явити прихований предмет, пригнічує її психологічний опір.

Обстежуючи предмет на наявність металу, недостатньо один раз провести приладом вздовж предмета. Необхідно дослідити всі його ділянки, двічі змінюючи кут, під яким переміщується МД (рис. 5.1). Також слід пам'ятати, що площа пошукового елемента приладу має бути паралельна площі таких металевих предметів, як лезо ножа, кільце, монета.



Рисунок 5.1 – Проведення огляду за допомогою МД

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі проведена класифікація типів МД і теоретичне обґрунтування фізичних основ їх роботи.

Розглянуті основні принципи роботи різних типів МД.

Проведені вимірювання випромінювань магнітних і електричних полів від МД типа **Garrett SuperScanner V** на різних відстанях від котушки. Форма сигналу від МД є синусоїдна.

Проведені вимірювання випромінювань магнітних і електричних полів від МД на різних відстанях від котушки з невизначеністю вимірювань 5%. Рівні випромінювання МД порівнювались з аналогічними даними для інших аналогічних пристроїв і порівнювалась з граничними впливами на робочому місці і серед населення. Не одна з граничних меж не була перевищена.

При спектральному аналізі випромінювання була виміряна частота коливань, можна стверджувати, що МД працює на одній частоті 55,654 кГц, яка при наближенні металевих предметів не змінюється з похибкою менше 0,01%. Це свідчить про те, що прилад побудований на принципі індуктивного балансу.

Дослідження реакції на метали - зразки з золота, срібла, міді, алюмінію, свинцю, електронної схеми (аналог закладного пристрою), сталі, фериту, показали, що МД реагує згідно заявлених виробником характеристик.

Описана методика пошуку закладних пристроїв у приміщенні і огляду підконтрольної особи для виявлення заборонених предметів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методи та засоби захисту інформації: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів/ А. М. Олейніков.–Харків: НТМТ, 2014 – 298с.
2. Омельченко Р. Проведення спеціального обстеження об'єктів з метою виявлення закладних пристроїв. URL:<http://securepolicy.blogspot.com>. (дата звернення: 08.11.2023).
3. Щедрин А. И., Осипов И. Н. Металлоискатели для поиска кладов и реликвий. - М.: "Радио и связь", "Горячая линия - Телеком", 2000 - 192 с, ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1232). ISBN 5-256-01456-0.
4. Щедрин А. И. Новые металлоискатели для поиска кладов и реликвий. -3-е изд., перераб. и доп.–М.: "Горячая линия - Телеком", 2003 – 176 с, ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1261). ISBN 5-93517-112-0.
5. Бландова,Є.С. Завадопоглинаючі вироби електронної техніки / Є.С. Бландова, Ю.І.Мещеряков, І.І. Серезенко //Електронна промисловість. - № 2. – 1997. – 44 - 48 с.
6. Березанский Д. П. Металлодетекторы – устройства досмотра. Вопросы нормирования требований //Специальная техника, №2,1998 - 101 с.
7. Науковий Вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць.– Львів: РВВ НЛТУ України. – 2014. – Вип. 24.02. – 408 с.
8. Элементарная теория металлоискателя. URL: [/https://www.rotr.info/electronics/practical/mdetector/simple_theory.htm](https://www.rotr.info/electronics/practical/mdetector/simple_theory.htm) (дата звернення: 01.11.2023).
9. URL:https://www.minelab.com/__files/f/11043/KBA_METAL_DETECTOR_BASICS_&_THEORY.pdf (дата звернення: 03.11.2023).
10. URL:<https://www.unionjacktools.com/content/PDF/Basic Principles Metal Detection. pdf> (дата звернення: 14.11.2023).
11. URL:https://inside.mines.edu/~jamcneil/TPT_Metal Detector. pdf (дата звернення: 04.12.2023).
12. URL:[https://www.researchgate.net/publication/Floderus Betal. \(2002\): Occupational exposures to high frequency electromagnetic fields in the intermediate range \(>300 Hz-10 MHz\)](https://www.researchgate.net/publication/Floderus_Betal_(2002):Occupational_exposures_to_high_frequency_electromagnetic_fields_in_the_intermediate_range_(>300_Hz-10_MHz)) (дата звернення: 09.12.2023).
13. URL:[https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/Boivin Wetal. \(2003\):Characterization of the magnetic fields around walk-through and hand-held metal detectors](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/Boivin_Wetal_(2003):Characterization_of_the_magnetic_fields_around_walk-through_and_hand-held_metal_detectors) (дата звернення: 15.12.2023).
14. Технические средства защиты информации. URL: https://doklady.bsuir.by/m/12_104571_1_62726.pdf (дата звернення: 19.12.2023).