НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____Анатолій ПРОТАСОВ
«___»_____20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»
спеціальності 151«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Металошукач»

Виконав:
студент IV курсу, групи ПК-61 Тріодял Ростислав Віталійович _____

Керівник:
к.т.н., доцент Баженов Віктор Григорович _____

Консультант з графіки:
ст. викладач, к.т.н. Богдан Г.А. _____

Консультант з розробки електричної схеми:
к.т.н., доцент Баженов В.Г. _____

Консультант з розробки програмного забезпечення:
асистент Дугін О.Л. _____

Рецензент:
Доцент к.т.н. Мокійчук В. А. _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2020 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	А4		Завдання на дипломний проект	2	
2	А4	ДП ПК6119. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	79	
3	А1	ДП ПК6119. 01.000 ТК	Котушка	1	
4	А4	ДП ПК6119. 02.000 ТК	Структурна схема	1	
5	А1	ДП ПК6119. 03.000 ТК	Схема електрична	1	
6	А1	ДП ПК6119. 04.000 ТК	Друкована плата	1	

				ДП ПК6119 00.000 ПЗ		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Тріодял Р.В.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Баженов В.Г.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-61	
Н/контр.	Лашко О.В.					
Зав.каф.	Протасов А.Г.					

Пояснювальна записка

до дипломного проекту

на тему: «Металошукач»

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність –151«**Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології**»
Освітньо-професійна програма «**Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики**»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____Анатолій ПРОТАСОВ
«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Тріодял Ростислав Віталійович

1. Тема проекту «Металошукач», керівник проекту Баженов Віктор Григорович к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. №1180-с

2. Термін подання студентом проекту 9 червня 2020 р.

3. Вихідні дані до проекту: Металошукач повинен: бути цифровим, містити мікроконтролер STM або AVR, мати функції калібрування і дискримінації, струм споживання приладу не більше 300 мА.

4. Зміст пояснювальної записки:
Вступ.
О металошукачах.
Види металошукачів.
О котушках для металошукачів.
Робочі частоти металошукача
Розрахунково-конструкторська частина.
Висновок.
Список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) __ креслеників
1- Схема структурна
2-Схема електрична
3-Котушка

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Графічний	Богдан Г.А. асистент		
Електричний	Баженов В.Г. к.т.н., доцент		
Програмний	Дугін О.Л. асистент		

7. Дата видачі завдання 15 лютого 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	15.03.2020	
2	Проведення аналітичного огляду	10.04.2020	
3	Розрахунок компонентів	25.04.2020	
4	Оформлення пояснювальної записки	15.05.2020	
5	Розробка креслеників	06.06.2020	

Студент Ростислав ТРІОДЯЛ

Керівник Віктор БАЖЕНОВ

Анотація

Дипломний проект складається із пояснювальної записки обсягом 79 сторінок, включає 28 ілюстрацій, 1 таблицю, 3 креслення, 17 посилань, 2 додатки, 6 формул.

Метою даного дипломного проекту є розробка цифрового металошукача з функціями калібрування і дискримінації, що призначений для пошуку металевих об’єктів: старовиних монет, вибухових снарядів часів другої світової, труб, старовиної зброї і т.д.

У першому вступному вступі було розглянуто перше історичне започаткування використанняя металошукачів, розвиток технології металошукачів і в яких сферах застосовують металошукачі на сьогоднішній день.

В другому розділі був проведений аналітичний огляд властивостей металу в електромагнітному полі, як залежить реакційний сигнал металевого об’єкту від робочої частоти металошукача.

В третьому розділі було розглянуто які види металошукачів існують на сьогоднішній день, їхні структурні схеми, основні принципи роботи, а також їхні переваги і недоліки.

В четвертому розділі були розглянуті види сучасних котушок, як впливають розміри і форми котушок на характеристики металошукачів.

В п’ятому розділі буду обрано найбільш оптимальну робочу частоту, використовуючи мій досвід за час використання металошукача на практиці.

В шостому розділі було створено структурну схему, обрано і розраховано вимірюючий генератор, проведені розрахунки котушки, обрано мікроконтролер і розроблено програмне забезпечення для нього.

Оскільки даний металошукач є цифровим, то окрім функцій калібрування і дискримінації, в нього можна інтегрувати інші цифрові функції(дистанційна передача даних, GPS і тд.). Ключові слова: металошукач, металодетектор, мікроконтролер, вихрові струми, електромагнітне поле, магнітне поле.

Annotation

The diploma project consists of an explanatory note of 78 pages, includes 28 illustrations, 1 table, 3 drawings, 17 references, 2 appendices, 6 formulas.

The aim of this diploma project is to develop a digital metal detector with calibration and discrimination functions, which is designed to search for metal objects: ancient coins, World War II explosive shells, pipes, ancient weapons, etc.

In the first introductory introduction the first historical beginning of use of metal detectors, development of technology of metal detectors and in what spheres metal detectors are applied today was considered.

In the second section, an analytical review of the properties of the metal in the electromagnetic field, how the reaction signal of a metal object depends on the operating frequency of the metal detector.

The third section considered what types of metal detectors exist today, their structural schemes, basic principles of operation, as well as their advantages and disadvantages.

In the fourth section, the types of modern coils, how the size and shape of the coils affect the characteristics of metal detectors were considered.

In the fifth section, I will choose the most optimal operating frequency, using my experience while using a metal detector in practice.

In the sixth section, a block diagram was created, a measuring generator was selected and calculated, coil calculations were performed, a microcontroller was selected and software was developed for it.

Since this metal detector is digital, in addition to the functions of calibration and discrimination, it can integrate other digital functions (remote data transmission, GPS, etc.).

Key words: metal detector,microcontroller, eddy currents, electromagnetic field, magnetic field.

Зміст

Стор.

1. Вступ 12

2. Про металошукачі 18

2.1. Властивості металу в змінному магнітному полі 21

2.2. Чутливість залежно від робочої частоти пристрою 23

2.3 Висновок до розділу 24

3. Види металошукачів 25

3.1 Металошукачі биття 25

3.2. Імпульсні детектори 26

3.3 Металошукачі з збалансованим передавально-приймальним зондом. 28

3.4 Висновок до розділу 30

4. Про котушки для металошукачів 31

4.1 Розміри котушки 31

4.2 Форма котушки 32

4.3 Види котушок 32

4.4 Висновок до розділу 36

5. Робочі частоти металошукача 37

5.1 Вибір робочої частоти 37

5.2 Висновок до розділу 38

6. Розрахунково-конструкторська частина 39

6.1 Структурна схема 39
6.2 Вимірюючий генератор 40
6.3 Розрахунок котушки 42
6.4 Вибір мікроконтролера 45
6.5 Розрахунок і створення програми для мікроконтролера 51
6.6 Вибір індикаторів 54
6.7 Вибір інших комплектуючих для металошукача 56
7. Висновок 58
8.Список використаної літератури 59

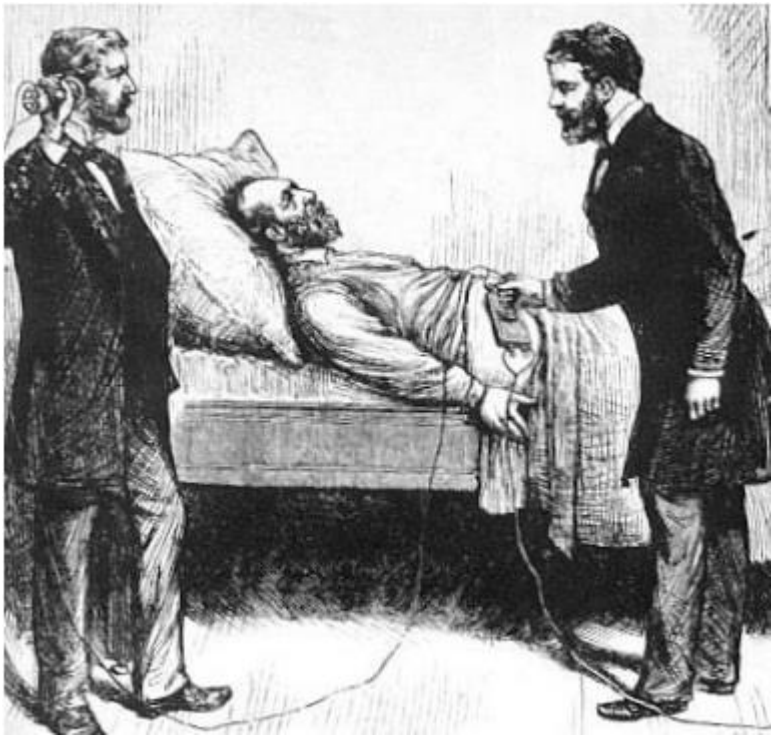
1. Вступ

Все почалося дуже давно. А якщо точніше, то приблизно двісті років до нашої ери. У найдавніших китайських документах того періоду згадується про таку собі арці в імператорському палаці, яка виконує функції детектора металевих предметів. Вона була встановлена в дверному отворі при вході в імператорські покої і захищала імператора від потенційних вбивць.

Арка була виконана з магнітного мінералу - магнетиту і за своєю формою нагадувала підкову. Для додання більш потужних магнітних властивостей, під час виготовлення, її нагрівали і робили ковку ручними кувалдами. У результаті виходила арка з магнітними властивостями, яка здатна притягувати до себе великі металеві предмети - ножі, шаблі, мечі і т.д. Тому пронести що-небудь металеве в покої імператора було неможливо, і потенційний ассасін залишався беззбройним.

Подальший розвиток ідеї виявлення металевих предметів за допомогою спеціального пристрою нерозривно пов'язане з науковими відкриттями в галузі фізики.

Відкриття зв'язку між електричним струмом і магнітним полем було фундаментом розробки детектора металів. У 1820 році, Hans Christian Ersted (1777-1851) показав, що стрілка компаса відхиляється під впливом струму, що тече через дріт. Наступні відкривачі, як Michael Faraday поглиблювали таємниці магнетизму і електрики. Різкий розвиток промисловості, а також багатолітні дослідження над електромагнетизмом дозволили будування пристроїв для виявлення металевих об'єктів ще в XIX столітті.



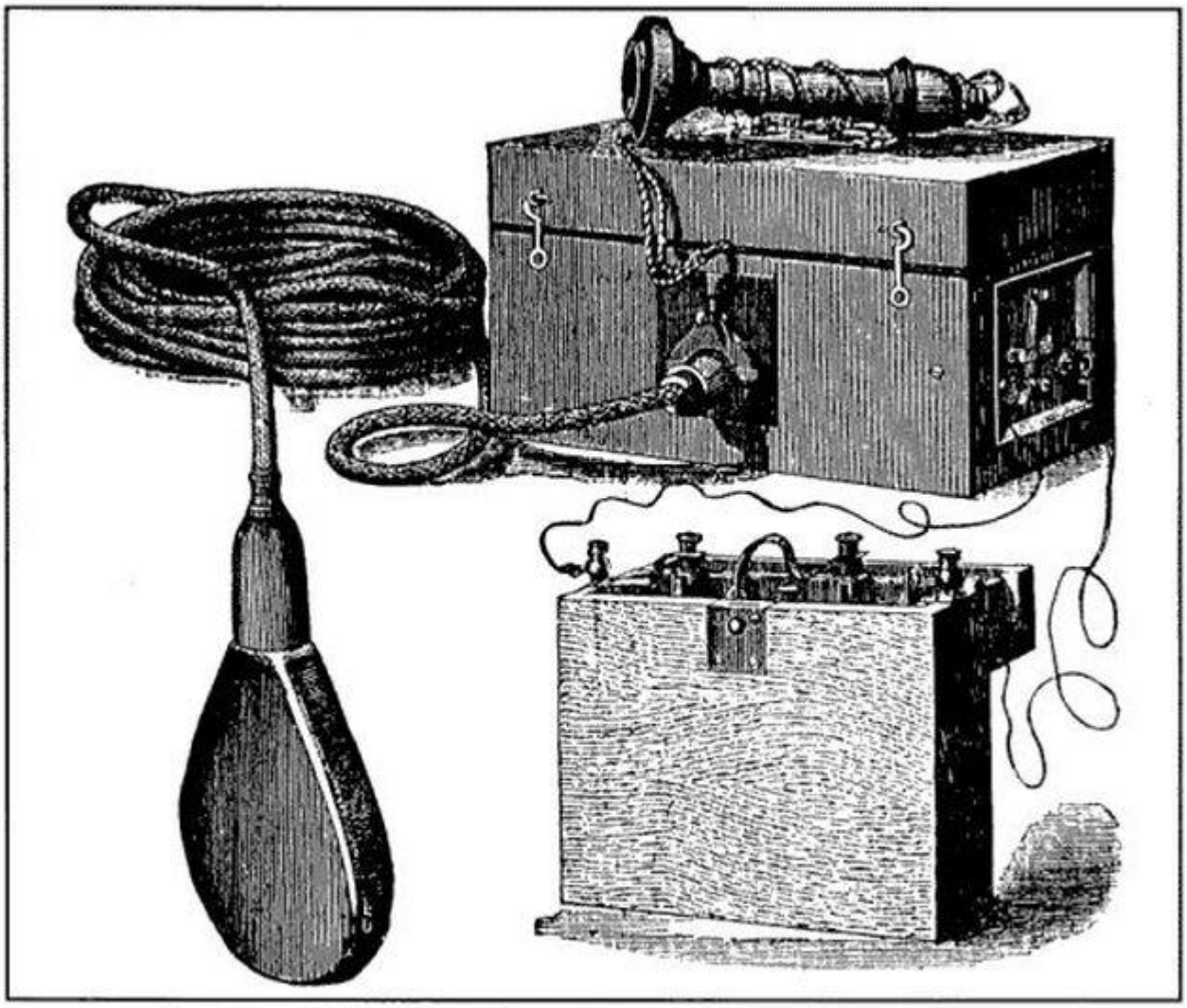
Малюнок 1.1 Ілюстрація, представляюча використання металошукача на тілі Президента Сполучених штатів Джеймса Гарфілда. Alexander Graham Bell разом з асистентом

Вищезгаданий малюнок представляє перше, практичне використання металошукача. У 1881 році, Alexander Bell ужив свій винахід до локалізації металевої кулі, що знаходилася, в тілі людини. На жаль, остаточно не вдалося знайти кулі. Вона знаходилася занадто глибоко в тілі. Президент помер незабаром, з приводу поганих санітарних умов і серйозної інфекції.

Своїми винаходами Белл дав сильний стимул для подальших досліджень і розробок в цій галузі. Інші винахідники і вчені загорілися ідеєю створення подібних приладів.

Цікаві нововведення вніс капітан Сі Ей Мак Евою (C.A. McEvoy), який створив перший підводний детектор в кінці дев'ятнадцятого століття.

Його прилад був невеликих розмірів, в герметичному і портативному корпусі. Усередині містилися дві налаштовуючі котушки, переривник і батарея. Також були навушники. Батарея складалася з двох елементів, але могла бути замінена магнітоелектричним генератором, який виконує змінний струм. Котушки з'єднувалися між собою ізольованим кабелем. Для зниження взаємодії з металевими частинами, використовувалися діелектричні матеріали - гумові шайби, гвинти зі слонової кістки і ебонітові ручки.



Captain McEvoy's underwater metal detector, circa 1905.

Малюнок 1.2 Підводний детектор Мак Евоян.

Принцип дії подібної конструкції був надзвичайно простий. Котушку опускали в воду і проводили сканування дна. У навушниках звучав безперервний слабкий сигнал. Коли поруч з котушкою з'являвся металевий предмет, то баланс порушувався і звук ставав дуже гучним, чистим і ясним, що і свідчило про виявлення предмета. Детектор збиралися використовувати на флоті для виявлення торпед. Але у конструкції був недолік - предмет, що знаходиться безпосередньо під котушкою, прилад «не бачив». І працював нестабільно. Тому на озброєння його не взяли.

У той же час Джордж Хопкінс показав свій власний винахід - пристрій для пошуку мінералів, яке вже не використовувало індукційний баланс, а котушки були розташовані перпендикулярно.

George Hopkins' electrical ore finder, circa 1904.

Малюнок 1.3 Пристрій Хопкінса.

Подібний детектор, що має котушку діаметром 6 або 8 дюймів, міг виявляти металеві руди, розташовані біля поверхні. Орієнтовна глибина виявлення - кілька дюймів (близько 5 - 10 сантиметрів).

Ранні конструкції детекторів металів також використовували у військах. Вже в 1882 році виник перший патент (US269439) Apparatus for Finding Torpedoes. Детектори металів головне стосувалися виявлення металевих мін. Одним з перших пристроїв цього типу розроблений в роках війни у Війську Польськім, так званого шукач мін польського типу. Через малий час почали застосовувати металошукачі в

цивільній промисловості. У 60 роках. XX ст., в гірничій промисловості використовували детектори металів для локалізації руд цінних металів. Швидкий розвиток мікроелектроніки останніх років дозволив будування металошукачів для багатьох верств населення. Нині детектори металів застосовують у багатьох сферах:

-харчова промисловість вимагає контролю якості з точки зору присутності металевих елементів в їстівних продуктах;

- особистий контроль в місцях з підвищеною безпекою;

- розмінування територій;

- археологія, пошук металевих предметів під поверхнею землі;

-виявлення присутності автомобіля на інтелектуальних перехрестях доріг;

-як промислові датчики близькості;

- пошук залізних метеоритів і металевих руд.

2. Про металошукачі

Металошукач служить для сигналізації присутності металевих об'єктів поблизу вимірювального зонду. Залежно від застосування, металошукач може мати диференційовані вихідні параметри і пропонувати різні функції, наприклад:

- детектування видів металевих матеріалів;
- оцінювання відстані до металу від вимірювального зонду;
- вимірювання параметрів досліджуваних металевих матеріалів:
  - •зміна амплітуди напруги на приймачі пристрою;
  - •зсув фази сигналу в приймальній частині;
  - •зміна параметрів вимірювальної котушки.

При конструюванні детектора, необхідною є можливість виявлення металевого предмета, а також подання інформації про знайдений матеріал. В металошукачі для археології користувач зазвичай очікує селективного виявлення металів кольорових або чорних.

Детектор металів застосовуваний як датчик або детектор, характеризується також такими параметрами як:

•чутливістю;

•невпевненістю вимірювання;

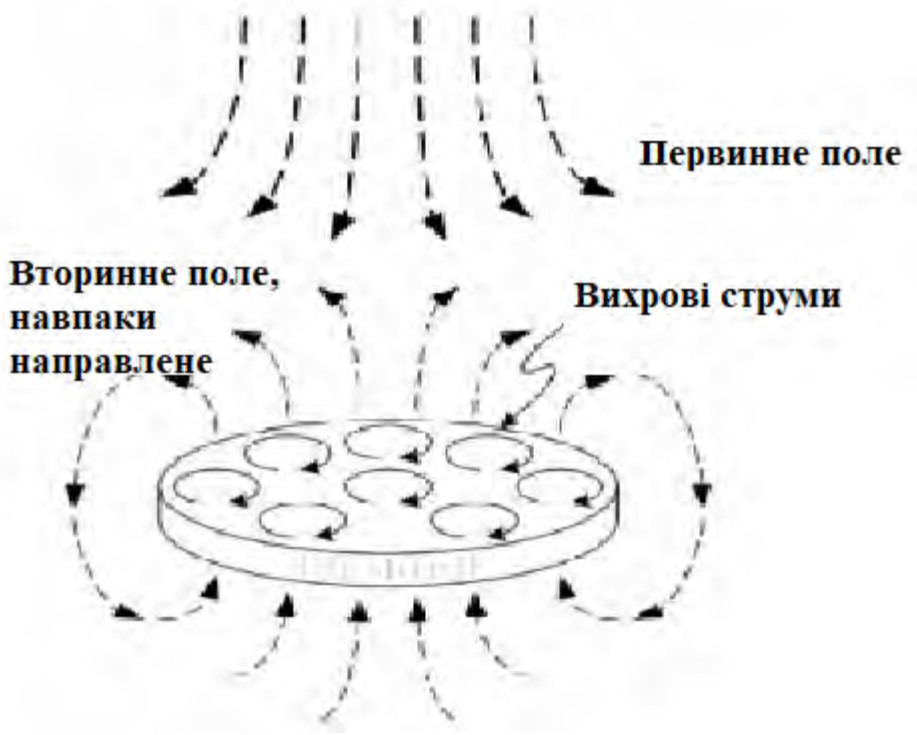
•вибірковістю(дискримінація);

•функцією обробки отримуваної інформації;

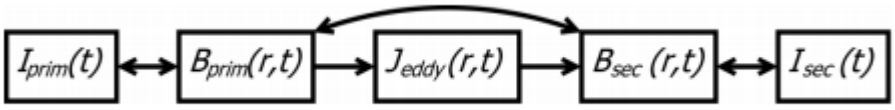
•стабільністю у часі, а також температурною стабільністю;

Підставою дії металошукача є створення і детектування змінного магнітного поля в оточенні досліджуваного простору. Головним простором зацікавленості є немагнітні метали. У спрощенні, метод виявлення кольорових металів зводиться до створення змінного магнітного поля в оточенні досліджуваного простору і детектування вторинного електромагнітного поля. Первинне поле створюється за допомогою відправного сигнала детектора. Якщо в межі первинного поля

знаходиться немагнітний металевий об'єкт, (напр. плоский кружечок, як на рис. 2.1) то в його тілі створюються вихрові струми.



Малюнок 2.1. Механізм генерації вторинного магнітного поля для неферомагнітного предмета



Малюнок 2.2. Схема сигналізації присутності немагнітного об'єкту в межі змінного магнітного поля. Позначення на малюнку: I_{prim} - первинний струм передавача, B_{prim} - первинна магнітна індукція, J_{eddy} – вихрові струми, B_{sec} – вторинна магнітна індукція, I_{sec}- вторинний струм приймача.

Вихрові струми виробляються головне на поверхні металу. То тісно пов'язане з ефектом Скіна (обмежена глибина проникання змінного поля).

$$SEM = -d\Phi_B/dt \qquad (2.1)$$

де SEM-електрорушійна сила;

Φ_B – магнітній потік.

Ефект Скіна - ефект зменшення амплітуди електромагнітних хвиль у міру їх проникнення вглиб провідного середовища. В результаті цього ефекту, наприклад, змінний струм високої частоти при протіканні по провіднику розподіляється не рівномірно по перетину, а переважно в поверхневому шарі.

Індуктивні струми існують згідно із законом електромагнітної індукції Фарадея (2.1). Натомість напрям електрорушійної сили є сумісним з правилом Ленса (знак мінус в (2.1)). Магнітна індукція B_{sec} (r, t) (рис. 2.2) протидіє причині виникнення. З того випливає, що B_{sec} (r, t) має протилежний знак до B_{prim} (r, t).

Зображає що:

$$B_{sec}(r,t) \propto -k \cdot B_{prim}(r,t), \qquad (2.2)$$

Де: k<<1 - вказівний фактор на те, що вторинне магнітне (створене через вихрові струми в провіднику) поле значно менше від первинного поля.

Магнітна індукція на певній відстані від круглої повітряної котушки може бути описана зразком:

$$B_{prim}(d) = \frac{\mu_0 \cdot M}{2 \cdot \pi (R^2 + d^2)^{3/2}}, \quad \textbf{де } M = N \cdot I \cdot \pi \cdot R^2 \qquad (2.3)$$

Яке для змінних значень d дає:

$$B_{prim}(0) = \frac{I \cdot \mu_0 \cdot N}{2 \cdot R}, \quad B_{prim}(2 \cdot R) \approx \frac{1}{11} \cdot B_{prim}(0),$$

$$B_{prim}(d) \approx \frac{M \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d^3} \text{ для } d \gg R \qquad (2.4)$$

де: B_{prim} - первинна магнітна індукція;

d – відстань об'єкта від центру котушки;

R – радіус котушки;

N - число витків котушки;

I - струм, що тече, через котушку;

μ_0 - магнітна проникність вакууму.

На підставі (2.3) і (2.4) можна зауважити, що магнітна індукція зменшується з кубом відстані (для d>>R). Корисні амплітуди сигналів, що походять, від металевого предмета тобто, зміни напруги в приймачі металошукача є зазвичай на ряду мікровольт.

2.1. Властивості металу в змінному магнітному полі

В залежності від типу металу, з якого створено поміщений предмет в магнітному полі, ми можемо отримати різну інформацію. Наприклад, розміщення непровідних феромагнетиків в магнітному полі, отримуємо значне посилення того ж поля. Це можна записати наступною формулою:

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \qquad (2.5)$$

Де $\vec{B}$ - вектор магнітної індукції;

μ_r -відносна магнітна проникність;

μ_0 - вакуумна магнітна проникність;

$\vec{H}$ -вектор напруженості магнітного поля.

Феромагнетики мають дуже високу відносну магнітну проникність, яка може досягати навіть 10^6. Характерною властивістю магнітного металу, розміщеного у змінному магнітному полі вимірювального зонда, буде зміцнення сигналу передавача і вироблення напруги (синфазного з сигналом передавача) в приймальній частині пристрою. Сигнал у фазі з відправним сигналом це так званий реакційний сигнал, в літературі найчастіше описуваний як складова X. Коли в змінному магнітному полі ми помістимо немагнітний метал з дуже великою електричною (напр. срібло) провідністю, то в його поверхневому просторі почнуть з'являтися вихрові струми. Отже вторинне поле буде направлено навпаки до первинного поля і вторинний сигнал буде в протифазі по відношенню до відправного сигналу. А отже, феромагнітні об'єкти, приводять до зменшення частоти, а об'єкти з кольорового металу навпаки збільшенню.

Добрим, фізичним прикладом магнітного матеріалу є ферит. Він володіє головними магнітними властивостями і дуже слабо проводить електричний струм. Вторинний сигнал, що походить від феритового предмета є реакційним. Такі матеріали як сталь також сильно магнітиться. Однак з огляду на більшу електричну провідність, в поверхневому просторі металу з'являються також вихрові струми. Отже ми отримуємо велику складову X, а також ненульову складову R.

Дуже добрим провідником струму є наприклад мідь, вживана в електроніці (не виявляє також магнітних властивостей). Згідно з правилом супротиву, сигнал, що походить, від товстого, мідного кружечка є майже в повній протифазі з

відправним сигналом. У приймачі з’являється дуже велика складова R, а також мала складова X. Також існує індукційне нагрівання, при якому частина цикрулюючих вихрових струмів витрачається на теплові втрати.
Дуже важливим фактором, є також середовище пошуку. При використані археологічних металодетекторів середовищем пошуку є ґрунт. Не рідко зустрічаються високомінералізовані ґрунти. Застосовуючи змінне магнітне поле, виявляється, що середовище також видає сигнал зворотного зв'язку. У сучасних металошукачах можна вирівняти вплив ґрунту.

2.2. Чутливість залежно від робочої частоти пристрою

Як вже раніше згадано, для правильної роботи детектора металів, слід створювати змінне магнітне поле. На жаль важко дати однозначну відповідь на питання про конкретну частоту сигналу. Комерційні археологічні пристрої найчастіше працюють на одній частоті.
На низьких частотах(2кГц-5кГц) найбільший вторинний сигнал виробляють магнітні сплави (сталь, залізо). Також у цьому діапазоні дуже добре виявляються кольорові метали зі великими поверхнями.
Металеві сплави, такі як нержавіюча сталь (немагнітний метал з низькою електропровідністю), видають сильний сигнал зворотного зв'язку майже виключно для високих частот (вище 20кГц), що генеруються пристроєм. Виробники комерційних детекторів рекомендують використовувати високі частоти для виявлення золотих самородків.
Взагалі кожен металевий сплав має свою певну характерну частоту, для якої він видаватиме найбільший вторинний сигнал. Використання декількох частот,

вироблених та проаналізованих металошукачем, дозволяє більш ефективно виявляти різні металеві сплави.

2.3 Висновок до розділу

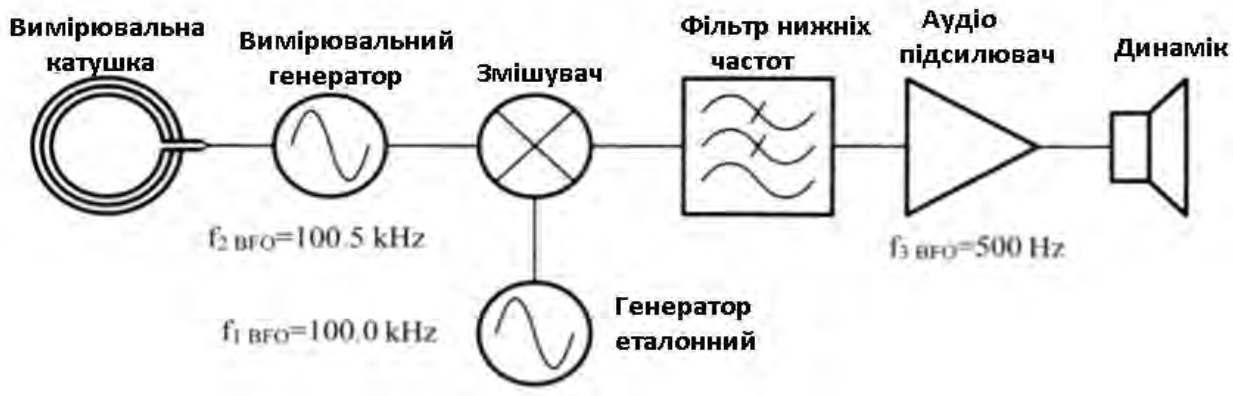
В цьому розділі було розглянуто: загальний принцип роботи металошукачів, властивості металів в змінному магнітному полі і залежність чутливості від робочої частоти металошукача.

3. Види металошукачів

У цьому розділі розглянуті три основні групи пристроїв. Це найпопулярніші види металошукачів, що застосовуються в широких масштабах.

3.1 Металошукачі биття

Металошукачі биття (eng. Beat Frequency Oscillator - BFO) засновані на одній з перших концепцій металошукачів. Металошукачі биття колись використовувалися в армії шукачі мін. Приклад - польський військовий металошукач W-3-P.



Малюнок 3.1 Функціональна схема металошукача биття

Принцип роботи детектора биття заснований на змішуванні сигналу від приймаючої котушки (вимірювальний генератор) з опорним сигналом (еталонний генератор). Це схематично показано на рисунку 3.1. Продуктом змішування є дві частоти: $f_{2\,BFO} + f_{1\,BFO}$ або $f_{3\,BFO} = f_{2\,BFO} - f_{1\,BFO}$

Більш висока частота знімається (низькочастотна фільтрація), а нижча ($f_{3\,BFO}$) подається на аудіо підсилювач. Коли металевий предмет знаходиться коло

вимірювальної котушки, індуктивність обмотки змінюється. Частота вимірювального генератора також змінюється. Результатом є зміна частоти звуку або звукова сигналізація.

Металошукач биття дозволяє розрізняти феромагнітні та неферомагнітні метали. При наближенні магнітного металу до вимірюючої катушки, індуктивність вимірюючої катушки зростає. Це призводить до зниження частоти звуку. Немагнітний металевий матеріал знижує індуктивність вимірювальної котушки збільшуючи частоту $f_{З\ ВГО}$.

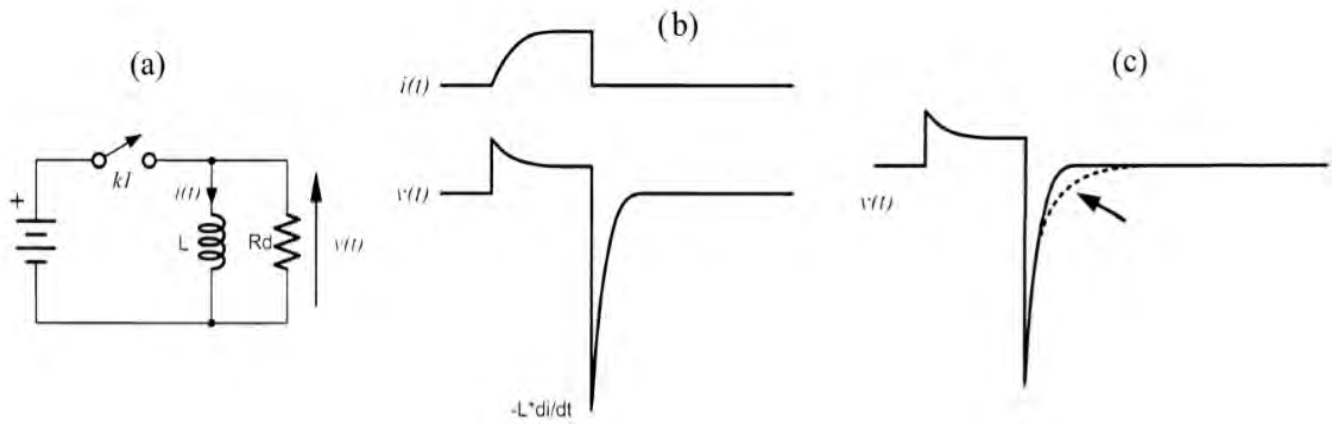
Незважаючи на простоту конструкції, детектори биття мають ряд недоліків:

1.Під час нормальної роботи, відбувається резонанс між вимірювальним генератором і еталонним генератором.

2. Відсутність імунітету до електромагнітних перешкод (наприклад, від електромережі).

3.2. Імпульсні детектори

Імпульсні детектори (PI) використовуються як у цивільних (археологічні хобі-детектори), так і у військових (міношукачі). Це дуже популярна група металошукачів.



Малюнок 3.2 Принципова схема роботи PI-детектора та сигналів напруги та струму в системі.

Імпульсні детектори, як правило, мають одну котушку приймача. Як уже було сказано, тільки змінне електромагнітне поле змушує протікати вихрові струми по поверхні провідника. Ідея імпульсної системи полягає в генерації короткого імпульсу напруги від генератора. Імпульс електромагнітного поля найчастіше генерується через систему з транзисторним ключем.

Принцип роботи пристрою показаний на рис. 3.2. На першій фазі роботи ключ k1 (рис. 3.21a) замкнутий, через що струм (t) тече через котушку (рис. 3.2b). Потім ключ відкривається, що викликає сильну перенапругу на індуктивність (форма хвилі v (t) на рис. 3.2b). Тривалість імпульсу напруги залежить від наявності металевих предметів біля котушки.

На рис. 3.2c представлені моменти підйому напруги на котушці за відсутності металевих предметів (суцільна лінія) та коли металевий предмет розташований біля вимірювального зонда (пунктирна лінія, позначена стрілкою). Вимірювання різниці в часі згасання імпульсу дозволяє інформувати користувача про виявлення металу. Через принцип виявлення металу імпульсні детектори називаються пристроями, які працюють в часової області. Перевагами пристроїв, що працюють в імпульсному режимі, є:

1.Простота конструкції.

2. Велика глибина детектування (в основному магнітних металів).

3. Низький вплив середовища на параметри пристрою.

Недоліки:

1. Розрізнити металеві сплави в цьому розчині дуже складно і дає лише приблизну інформацію.

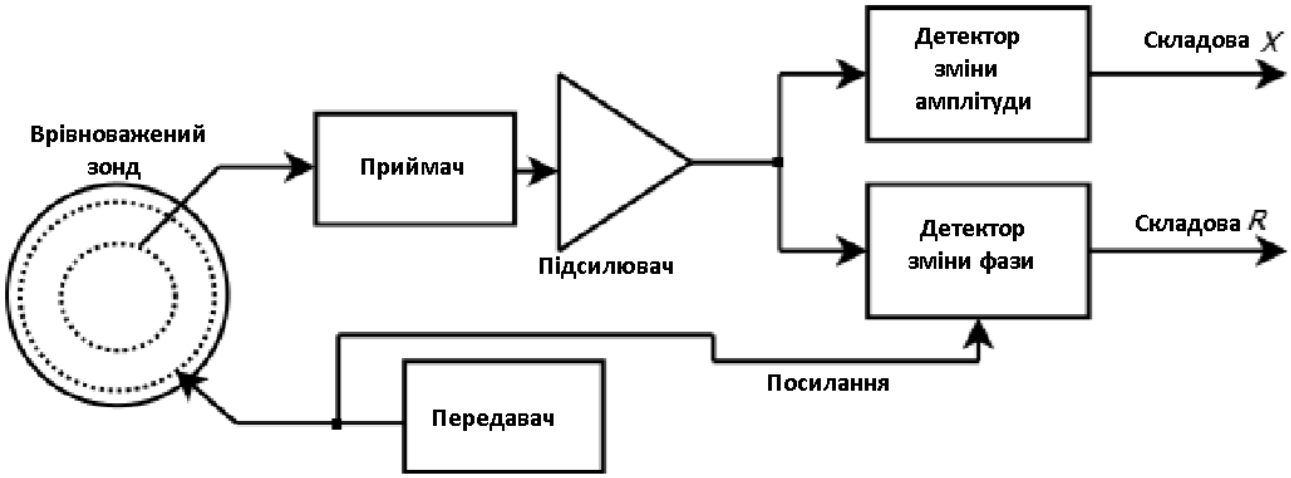
2. Збільшена чутливість на магнетичні (напр. залізо) метали.

Детектори типу PI є дуже цікавою групою шукачів з непоганими параметрами.

3.3 Металошукачі з збалансованим передавально-приймальним зондом.

Металошукачі TR (eng. Transmit-Receive –TR) - найпопулярніші і найскладніші конструкції, які застосовують. Вони також використовуються у промисловості, наприклад, в передових виробничих процесах.

Принцип їх роботи заснований на безперервному генеруванні змінного електромагнітного поля передавальною котушкою. У котушці приймача індукується певний сигнал дисбалансу, який змінюється, коли біля вузла пошукової котушки присутній металевий предмет.



Малюнок 3.3 Структурна схема детектора з врівноваженим зондом.

На малюнку 3.3 показана блок-схема металошукачів з врівноваженим зондом. Резонансний передавач генерує синусоїдальний керуючий сигнал. Напруга, що надходить від вузькосмугової приймальної системи, попередньо підсилюється. Потім інформація про зміну амплітуди та зміну фази витягується з приймаючого сигналу. Як правило амплітудні та фазові детектори використовують синхронні випрямлячі. Завдяки компонентам R і X користувач інформується про наявність металевого предмета на індикаторі. На основі цих компонентів можна виділити металеві сплави та вибірково виявити кольорові метали (сигнал виявлення феромагнетиків замаскований). З огляду на принцип роботи, металошукачі ІВ (зустрічаються також назви: ІВ (eng. Iduction Balance – ІВ) або VLF (eng. Very Low Frequency – VLF)). визначаються як працюючі пристрої в частотній області (англ. Frequency Domain).

Комерційні конструкції металошукачів зазвичай мають два режими роботи: статичний і динамічний. У динамічному режимі потрібно постійно переміщувати зонд над металевим предметом, щоб пристрій передав сигнал про виявлення об'єкта. У статичному режимі рух зонда відносно досліджуваної області не є необхідним.

Перевагами детекторів з збалансованим передавально-приймальним зондом є:

1. Непогана дискримінація виявлених металевих сплавів.
2. Висока чутливість до предметів з невеликими поверхнями та виготовлених з кольорових металів.

Недоліки:

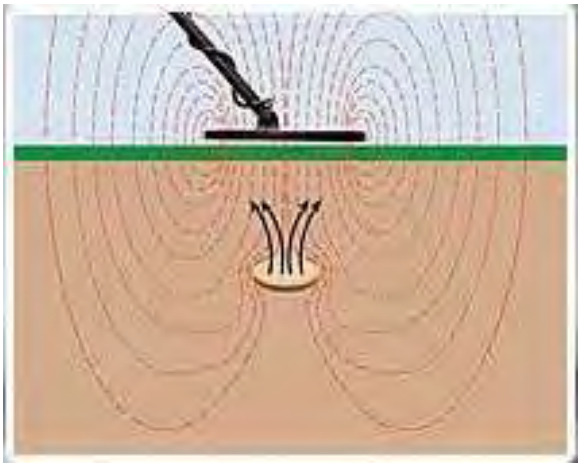
1. Висока складність конструювання детекторів TR.
2. Спроектувати DD котушку можна тільки емпіричним методом.

3.4 Висновок до розділу

У цьому розділі було описано основні види металошукачів на сьогоднішній день, їх принципи роботи, загальні структурні схеми, переваги і недоліки.

4. Про котушки для металошукачів

Одним з головних моментів, які впливають на характеристики та якість пошуку, є котушка. Вона має свої характеристики, які впливають на пошук.



Малюнок 4.1 Електромагнітне поле навколо котушки металошукача

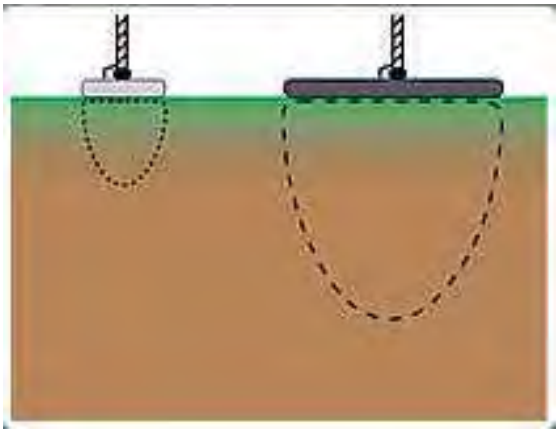
4.1 Розміри котушки

Взагалі існує 3 розмірності котушок:

А) Великі. Великі котушки призначені для пошуку на вибитій місцевості, тобто там де вже ходили з металошукачами. Такі котушки мають найглибшу проникну здатність, але водночас вони є найважкішими, незручними для пошуку на зарослій місцевості.

Б) Середні. Такі котушки є універсальними і оптимальними.

В) Маленькі. Маленькі котушки призначені для пошуку на засміченій місцевості (зазвичай це пляжі). Мають найменшу проникну здатність, але найкращу дискримінацію на засміченій місцевості і найменшу вагу, що дозволяє довше використовувати металошукач пошуківцю.



Малюнок 4.2 Залежність розмірів електромагнітного поля від розміру котушки

4.2 Форма котушки

В загалі існує дві форми котушок для металошукача. Є еліпсоїдна і кругла.

А) Котушка Еліпс краще «розділяє» цілі, які розташовані близько один до одного. У еліпсоїдних котушок вище точність режиму пінпоінт (це режим який дозволяє знайти центр сигналу), плюс менше вага.

Б) Кругла котушка має більше глибину, в порівнянні з еліпсом. Це перевірити важко - треба одну і ту ж котушку різної форми, пробувати на одній і тіж самій моделі металошукача. На практиці кругла котушка дійсно на монеті додає 1-2 сантиметри.

4.3 Види котушок

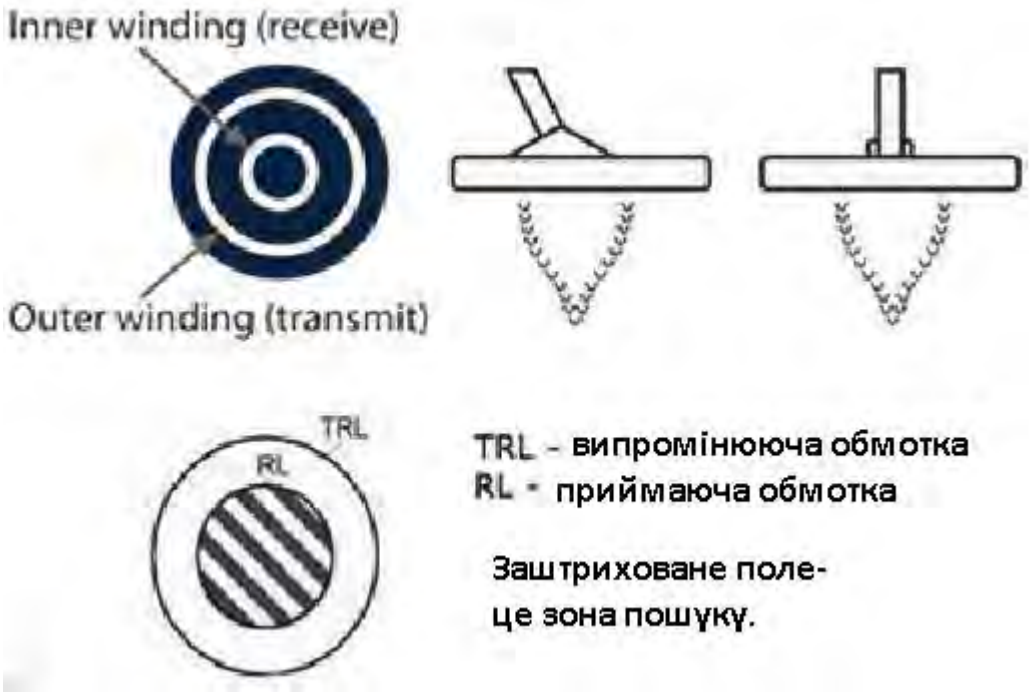
Взагалі є 2 основні види котушок Концетричні і DD.

А) Концетрична котушка

Особливість концентричної котушки полягає в тому, що передавальна та приймаюча обмотка знаходяться як найдалі між собою. Це допомогає створити

симетричне поле (і за цього непогана точність піпоінта), трохи краще дискримінація знахідок яки лежать поряд одна з одною при одній проводці (з конусної форми поля).

Концентричні котушки призначені для усіх існуючих знахідок. Тобто ці котушки універсальні. Також вони залежать від впливу високої мінералізації ґрунту, при підвищенні мінералізації котушка втрачає проникну здатність у ґрунті.



Малюнок 4.3 Концетрична котушка

Б)Моно котушка

Моно котушки застосовуються в імпульсних металошукачах. Моно котушка, це різновид концентричних. Її характерна особливість в тому, що приймаюча і передавальна обмотка розташовані поруч. Має ті ж властивості, що й концентрична, включаючи залежність від мінералізації ґрунту.

Малюнок 4.4 Моно катушка

В)Котушка Imaging

Це також один із видів концентричної котушки. Особливість цього типу котушок в тому, що вони мають додаткову приймаючу обмотку. Це дає металошукачу більш точно визначити характеристики знахідки, яка ще не викопана. Наприклад в оцінці розмірів знахідки, до її викопування.

Garrett стверджує що цей тип котушок є тільки у них (серія детекторів GTI), і ніякий інший металошукач в світі цим похвалитися не може.

Малюнок 4.5 Котушка Imaging

Г) Котушка DD

Особливості DD котушки значні. Призначена для кольорових цілей, непогана чутливість для маленьких металевих об’єктів. На відміну від Концентричних з полем у формі конуса, DD котушки мають поле форми «плоске відро» (однакова видимість на будь-якій глибині, але при цьому втрачається точність режима пінпоінта). Ще DD котушки менше залежать від ґрунту з високою мінералізацією, і в такому середовищі не втрачають глибину детектування.

Малюнок 4.6 DD котушка

	Mars goliaf «15»	монета 44 см
	Mars Discovery «13»	монета 42 см
	Nel STORM «13x14»	монета 43 см
	Nel Thunder «10,5x14,5»	монета 43 см
	Nel Tornado «12x13»	монета 42см
	Mars TAIGER «12,5x9,5»	монета 39см

Таблиця 4. Таблиця DD котушок з глибинами детектування від інтернет магазину (розміри котушок вказані у дюймах)

4.4 Висновок до розділу

У цьому розділі були розглянуті види котушок для металошукачів, залежність глибини проникнення від розмірів котушки та різниця між формами різних котушок.

5. Робочі частоти металошукача

5.1 Вибір робочої частоти

За час моєї практики користування металошукачем КОЩЕЙ Х-45, можу зазначити що найбільш оптимальною частотою для пошуку є діапазон частот від 10 кГц до 12 кГц. Так ось, що показала моя практика:

А)6 кГц

Переваги:

-велика проникна здатність в ґрунті для великих залізних об’єктів;

Недоліки:

-досить чутлива до електромереж(ЛЕП);

-не детектується золото;

-погано ловить маленькі металеві об’єкти пошуку.

Б)8 кГц

Переваги:

-непогана проникна здатність;

-на цій частоті найкраще детектуються мідні об’єкти пошуку.

Недоліки:

-чутлива до електромереж(ЛЕП);

-не детектується золото;

-погано ловить маленькі металеві об’єкти пошуку.

В) 12 кГц

Переваги:

-на цій частоті найкраще детектується срібло;

-досить непогано ловить маленькі металеві об’єкти пошуку;

-досить стійка проти електромереж.

Недоліки:

-погано детектується мідь.

Г)19 кГц:

Переваги:

-найкраща дискримінація для маленьких неферомагнітних об’єктів пошуку;

-найбільш стійка до електромереж;

-найкраще ловить маленькі об’єкти.

Недоліки:

-Найменша проникна здатність з усіх перелічених частот;

-Часто іржаві залізні об’єкту пошуку показує як кольоровий метал.

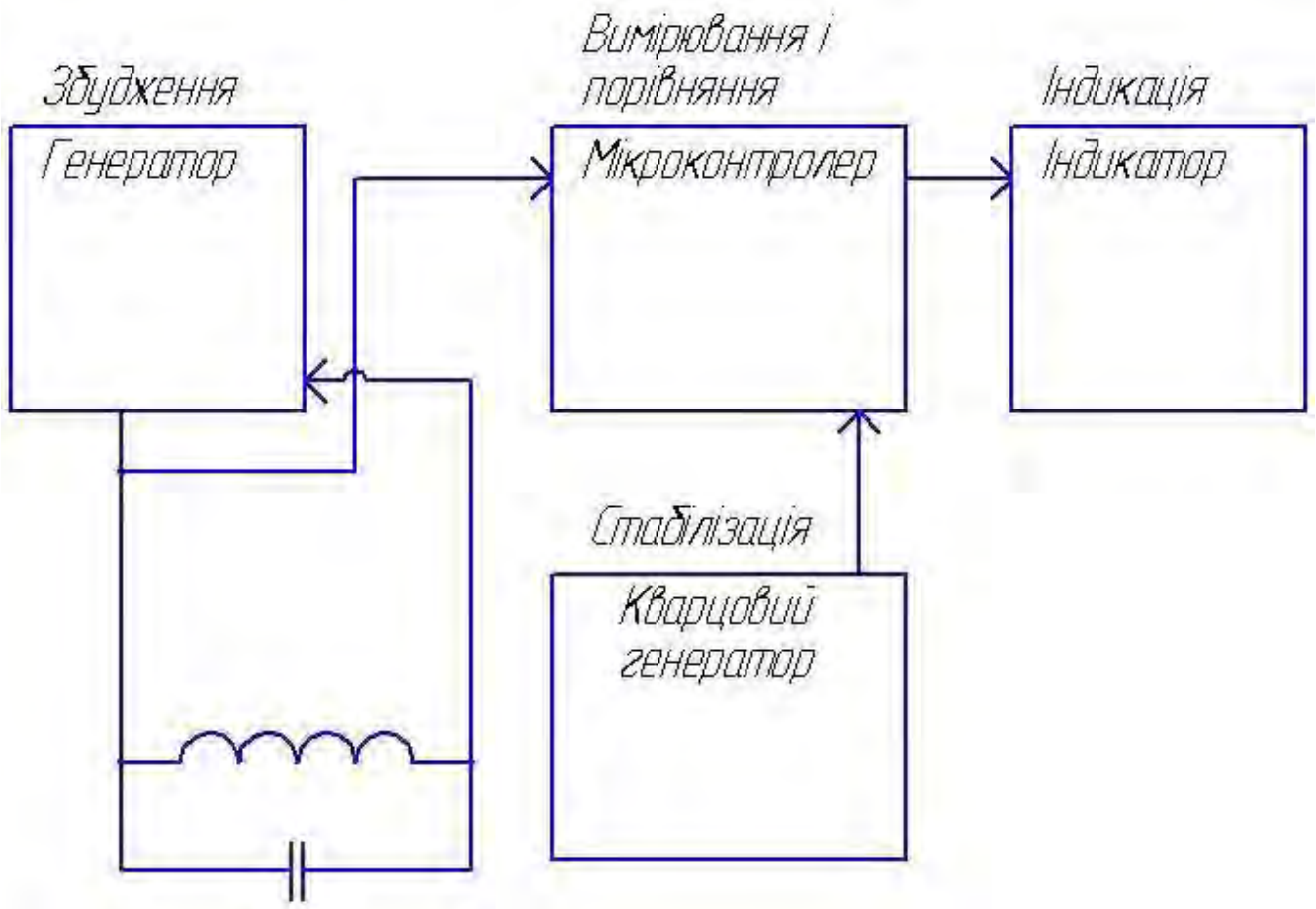
З цього можна зробити висновок, що найбільш оптимальною частотою є 12 кГц, оскільки в неї найбільше переваг і найменше недоліків.

5.2 Висновок до розділу

З цього розділу можна зробити висновок, що найбільш оптимальною частотою є 12 кГц, оскільки в неї найбільше переваг і найменше недоліків.

6. Розрахунково-конструкторська частина

6.1 Структурна схема



Малюнок 6.1 Структурна схема

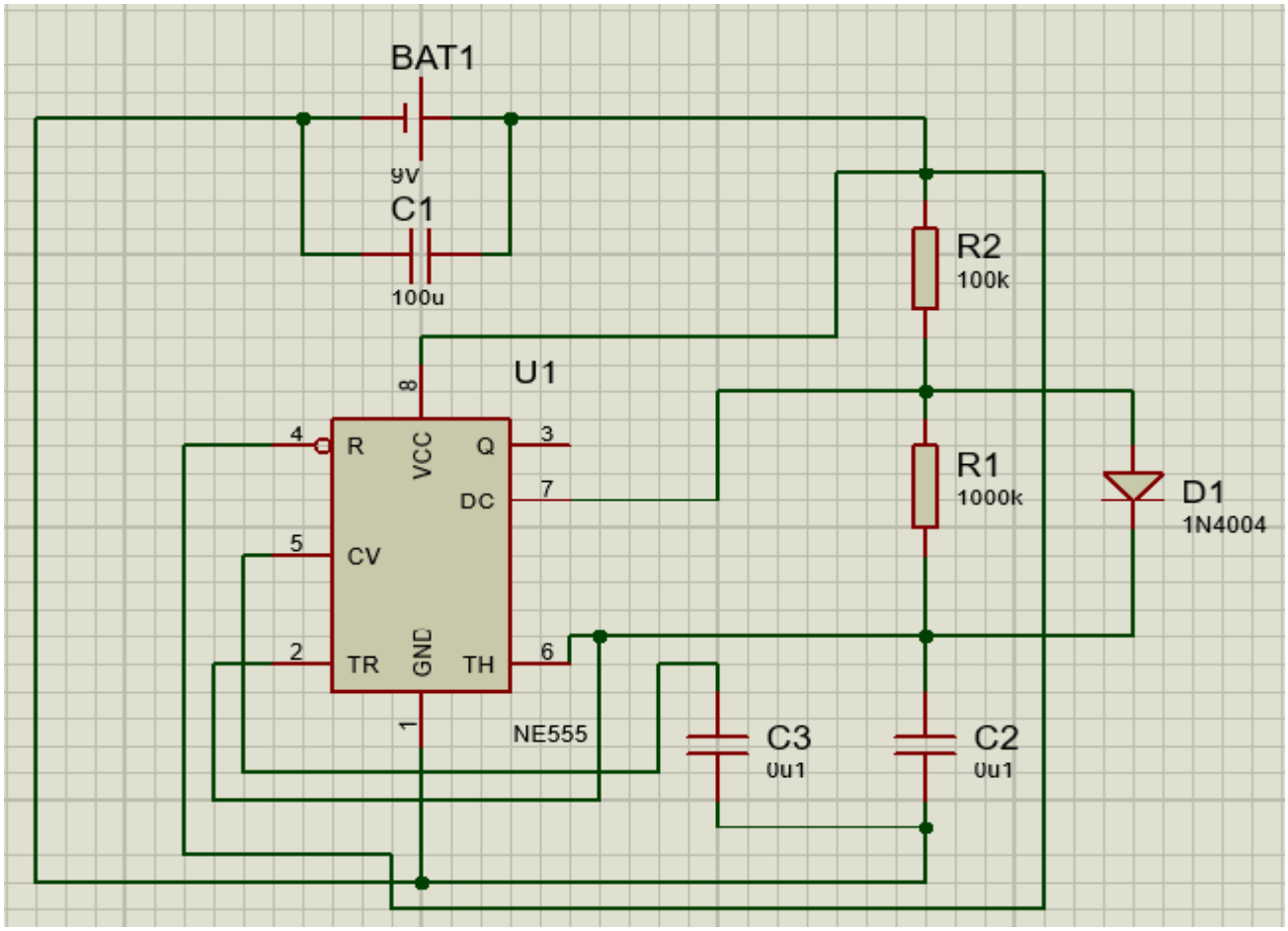
Принцип роботи:

Генератор, який побудований на таймері NEE555, збуджує сигнал з частотою 12 кГц, у коливальному контурі. Мікроконтролер вимірює кількість імпульсів сигналу на коливальному контурі за період вимірювання. При потраплянні металевого об’єкту в електромагнітне поле коливального контуру, параметри сигналу, який надійшов в коливальний контур будуть змінені. Зміна параметрів

сигналу залежить від розмірів і форми об’єкту і чи феромагнітний об’єкт чи ні. Далі цей змінений сигнал потрапляє у мікроконтролер, де вимірюються його параметри і порівнюється з еталонним сигналом, і якщо є різниця, то з мікроконтролера іде сигнал на індикатор (динамік і графічний індикатор). Очевидно, що в такій конструкції буде ефект паразитного взаємної синхронізації генераторів, тому треба щоб різниця по частоті між кварцовим генератором і генератором збудженням була як можна більше.

6.2 Вимірюючий генератор

В якості вимірюючого генератора, використаємо таймер NE555 у автоколивальному режимі.



Малюнок 6.2 Схема вимірюючого генератора

Розрахунок робочої частоти:

$R1 := 10^{6}$ Ом $R2 := 10^{5}$ Ом

$C2 := 0.1 \cdot 10^{-6}$ Ф

$$f := \frac{1440}{(R1 + 2 \cdot R2) \cdot C2} = 1.2 \times 10^{4} \text{ Гц}$$

Для запобігання наведень візьмемо:

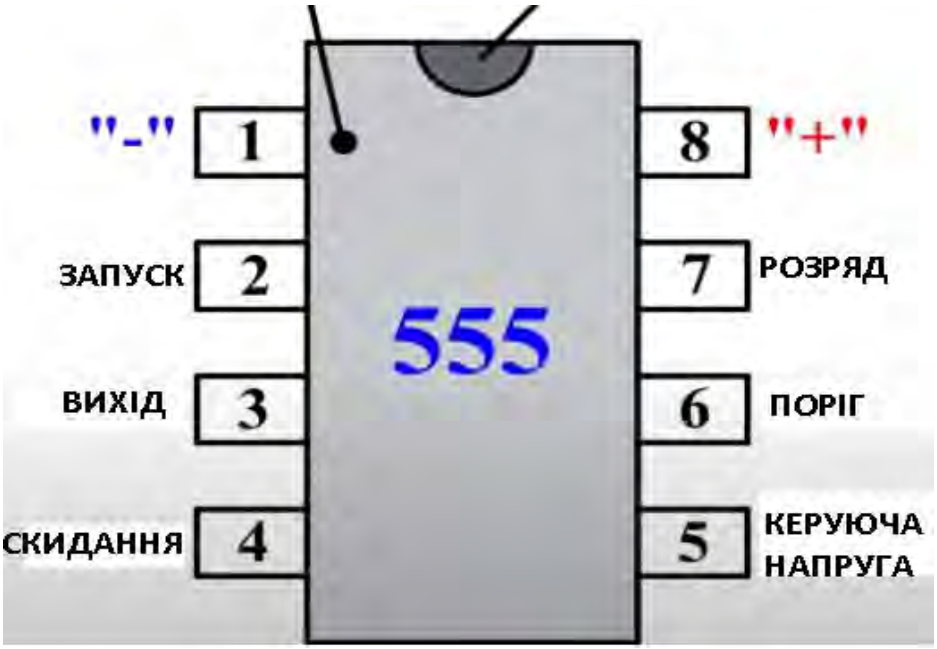
$C3 := 0.1 \cdot 10^{-6}$ Ф

Для стабільної роботи мікросхеми NE555, треба підключити між ніжками 1 і 8 електролітичний конденсатор ємність від 100 мкФ, для захисту від перенапруги, при відключенні і включенні джерела напруги, а також від деяких перешкод. Тому:

$C1 := 100 \cdot 10^{-6}$ Ф

Для шпаруватості сигналу 1:1, підключаємо діод паралельно до R2.

Пояснення мікросхеми NE555:



Малюнок 6.3 NE555

Напруга при якій працює NE555: 5...15 В.

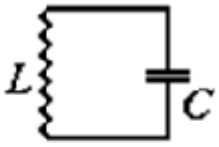
Максимальний струм проходження 0.1 А.

Для запуску мікросхеми NE555 треба на 2 ніжку подати напругу від 0 В до 1/3 В від джерела напруги, або короткочасно підключити до ‘-‘ джерела напруги.

Максимальний споживчий струм 203 мА.

6.3 Розрахунок котушки

Для того щоби металошукач працював максимально ефективно, треба що би частота вимірювального генератора максимально співпадала з резонансною частотою паралельного коливального контуру, тобто 12 кГц.



$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Малюнок 6.4 Паралельний коливальний контур і формула його резонансної частоти

Де L-індуктивність котушки, С-ємність конденсатора.

Для того щоби порахувати кількість витків котушки треба визначитися з внутрішнім діаметром котушки ,діаметром мідного дроту для котушки, конденсатором в коливальному контурі і порахувати індуктивність котушки.

Я пропоную взяти для даного металошукача внутрішній діаметр котушки 28 см і круглу форму котушки, для більшого охоплення зони пошуку і діаметр мідного дроту для котушки 0.3 мм.

Візьмемо конденсатор ємністю 68 нФ.

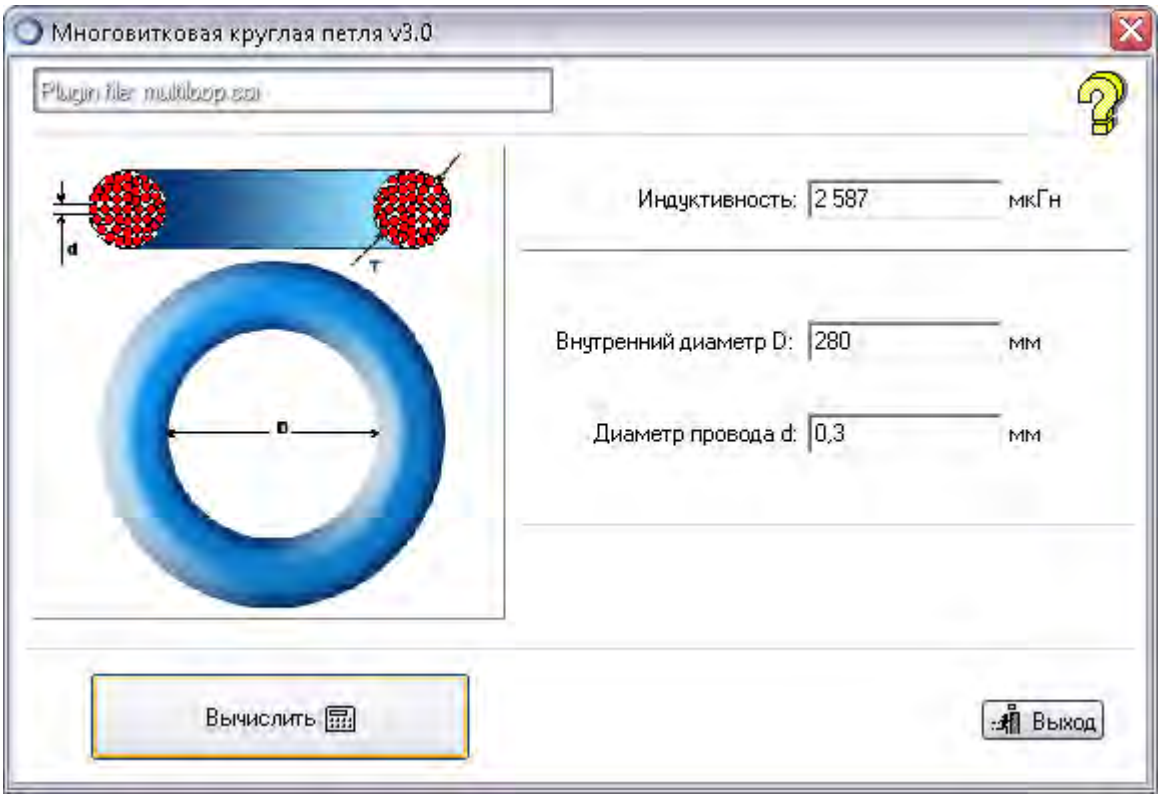
Розрахунок індуктивності котушки на 12кГц:

$$C4 := 68 \cdot 10^{-9} \quad Ф$$

$$L := \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{C4}}\right)^2 = 2.587 \times 10^{-3} \, Гн$$

$$L \cdot 10^6 = 2.587 \times 10^3 \quad мкГ$$

Для розрахунку кількості витків і товщини обмотки використаємо програму Coil32 v9.2.



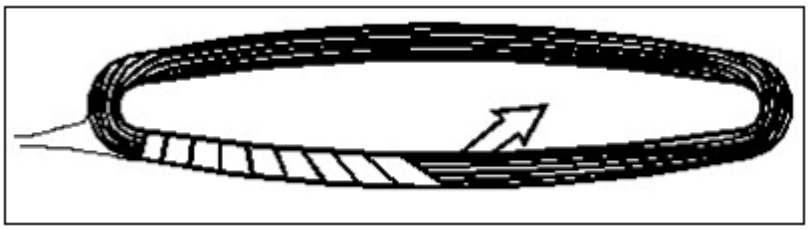
```
plugin ---------------------------------------------------------------------

Многовитковая круглая петля v3.0

        Индуктивность: 2587 мкГн
        Внутренний диаметр D: 280 мм
        Диаметр провода d: 0,3 мм
=> Число витков катушки: w =  67,6
=> Толщина петли T =  17,8 мм
```

Малюнок 6.5

Вийшло, що кількість витків для даної котушки треба 67.6 , а товщина обмотки 17.8 мм.

Конструкція пошукової котушки - може бути створена різними способами. Основні вимоги до неї - жорсткість конструкції і герметичність. Один із варіантів виготовлення котушки:

Береться дошка відповідного розміру і на ній малюється коло діаметром 280 мм. Потім рівномірно по колу в дошку забиваються невеликі цвяхи - 15 ... 20 штук. На ці цвяхи намотується 68 витків мідного дроту діаметром 0.3 мм. Після намотування цвяхи витягають або підгинаються і котушка знімається з оправи. Наступний етап - обмотка котушки ізоляційною стрічкою. Обмотування відбувається нахльостуванням. На завершенні треба випустити назовні кінці обмотки. Див. Мал.6.6



Малюнок 6.6 Обмотка котушки липкою стрічкою

До цих кінців обомтки котушки паяють кабель, який з'єднує котушку з металошукачем. Жорсткість котушці надають різними методами. Один з них - підібрати підходящий корпус, наприклад, взяти кришку від набору пластикового

посуду, помістити в нього котушку і залити епоксидною смолою. Перед цим необхідно зробити в корпусі отвір і протягнути в нього кабель.

6.4 Вибір мікроконтролера

При виборі мікроконтролера було 4 критерії:

1.Наявність двох таймерів/лічильників.

2.Максимальна частота процесору, але не більше 20 МГц, бо при лічбі імпульсів відносна похибка становила би більше 1%.

3.Мінімальні розміри.

4.Низьке енергоспоживання.

І вибір впав на мікронтролер Atmega324P.

Atmel® picoPower® ATmega324P представляє собою 8-розрядний CMOS с низьким енергоспоживанням мікроконтролер на базі розширеної архітектури RISC AVR®. Виконуючи потужні інструкції за один тактовий цикл, ATmega324P досягає пропускної здатності, близької до 1MIPS на МГц. Це дає можливість розробнику системи оптимізувати пристрій за споживанням енергії та швидкістю обробки.

Особливості:

Високопродуктивна, низьке енергоспоживання сімейства мікроконтролерів Atmel® AVR® 8 біт.

•Розширена архітектура RISC:

- 131 інструкція.

-Максимальна швидкість виконання циклу.

- 32 x 8 працюючих регістрів загального призначення

- Повністю статичні операції.

- Пропускна здатність До 20 MIPS на 20 МГц.

-На мікросхемі двох тактний перемножувач.

• Висока витривалість енергонезалежних сегментів пам’яті.

- 32Кбайт флеш-пам’яті(це тип довготривалої комп'ютерної пам'яті, вміст якої можна видалити чи перепрограмувати електричним методом.).

-1Кбайт EEPROM(один з видів енергонезалежної пам'яті).

- 2Кбайт SRAM(статична оперативна пам'ять).

- Цикли запису / стирання: 10000 флеш / 100 000 EEPROM.

- Збереження даних: 20 років при 85 ° C / 100 років при 25 ° C .

-Додатковий розділ коду завантаження с незалежними бітами блокування.

•Внутрішньосистемне програмування за допомогою завантажувальної програми на мікросхемі.

• Справжня операція Read-While-Write.

-Блокування програмування для безпеки програмного забезпечення.

•Підтримка бібліотеки Atmel QTouch®

-Ємнісні сенсорні кнопки, повзунки та колеса.

-Придбання QTouch та QMatrix.

- До 64 чутливих каналів.

•Інтерфейс JTAG (IEEE std. 1149.1)

-Можливості граничного сканування відповідно до стандарту JTAG.

-Широка підтримка налагодження на мікросхемі.

-Програмування Flash, EEPROM, запобіжників та блокування через інтерфейс JTAG.

•Периферійні особливості

-Два 8-бітових таймерів / лічильників з дільником і режимом порівняння.

-Один 16-розрядний таймер / лічильник з роздільним попередньою програмою, режим порівняння та режим захоплення.

-Лічильник реального часу з окремим осцилятором.

-Шість каналів ШІМ.

- 8-канальний 10-бітний АЦП.

•Диференціальний режим з можливістю вибору коефіцієнта посилення в x1 , x10 або x200 .

- Однобайтовий двухпровідний послідовний інтерфейс(сумісний з Philips I2C).

- Два програмуючих послідовні порти USART.

- Програмований Watchdog таймер з окремим осцилятором на мікросхемі.

-На мікросхемі є аналоговий компаратор.

- Переривання та пробудження на Pin Change.

•Спеціальні властивості мікроконтролера

-Скидання, включення та програмоване Broun-out Detection.

-Внутрішній калібрований RC-генератор.

-Зовнішні та внутрішні джерела переривання.

- Шість режимів сну: режим очікування, зменшення шуму АЦП, економія енергії, вимкнення живлення, очікування та розширений режим очікування.

•I/O та пакети

-32 Програмовані лінії вводу / виводу.

-40-контактний PDIP.

-TQFP з 44 відведеннями.

-44-pad VQFN / QFN.

•Робоча напруга:

-2.7 - 5.5V для ATmega324P.

•Класи швидкості

-ATmega324P:

• 0 - 10MHz @ 2.7V - 5.5V.

• 0 - 16MHz @ 4.5 - 5.5V.

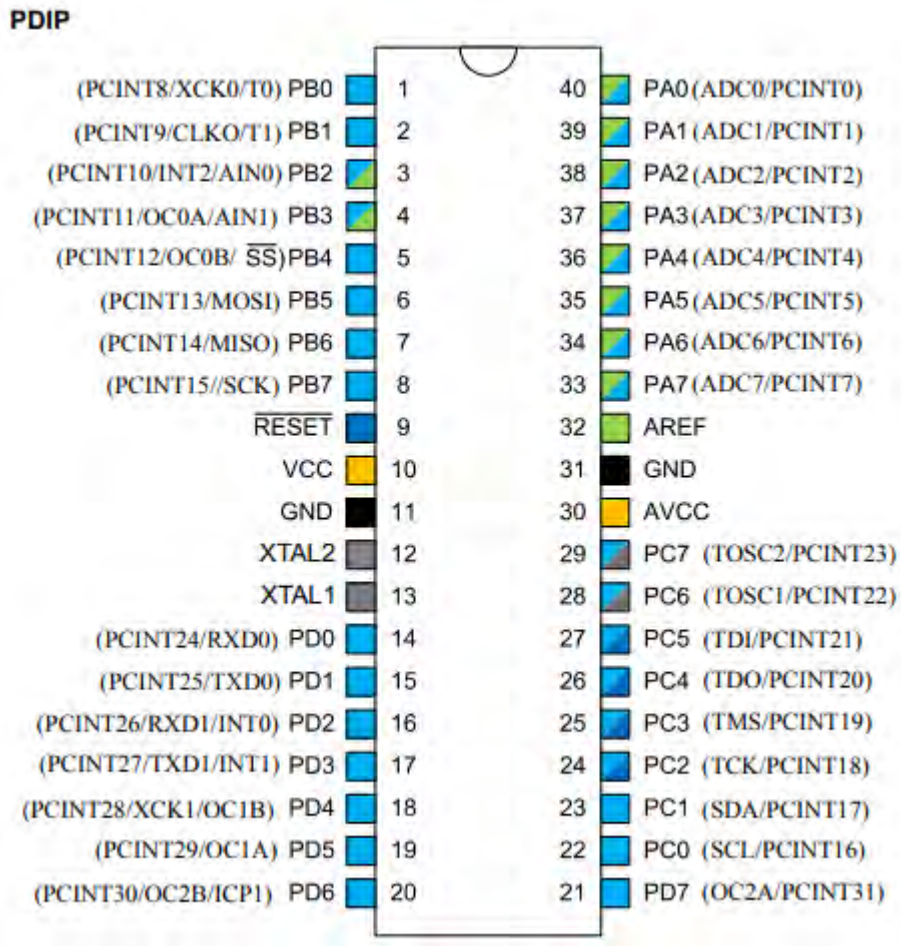
•Споживання енергії на 1 МГц, 1,8 В, 25 ° C

- Активний режим: 0,4 мА.

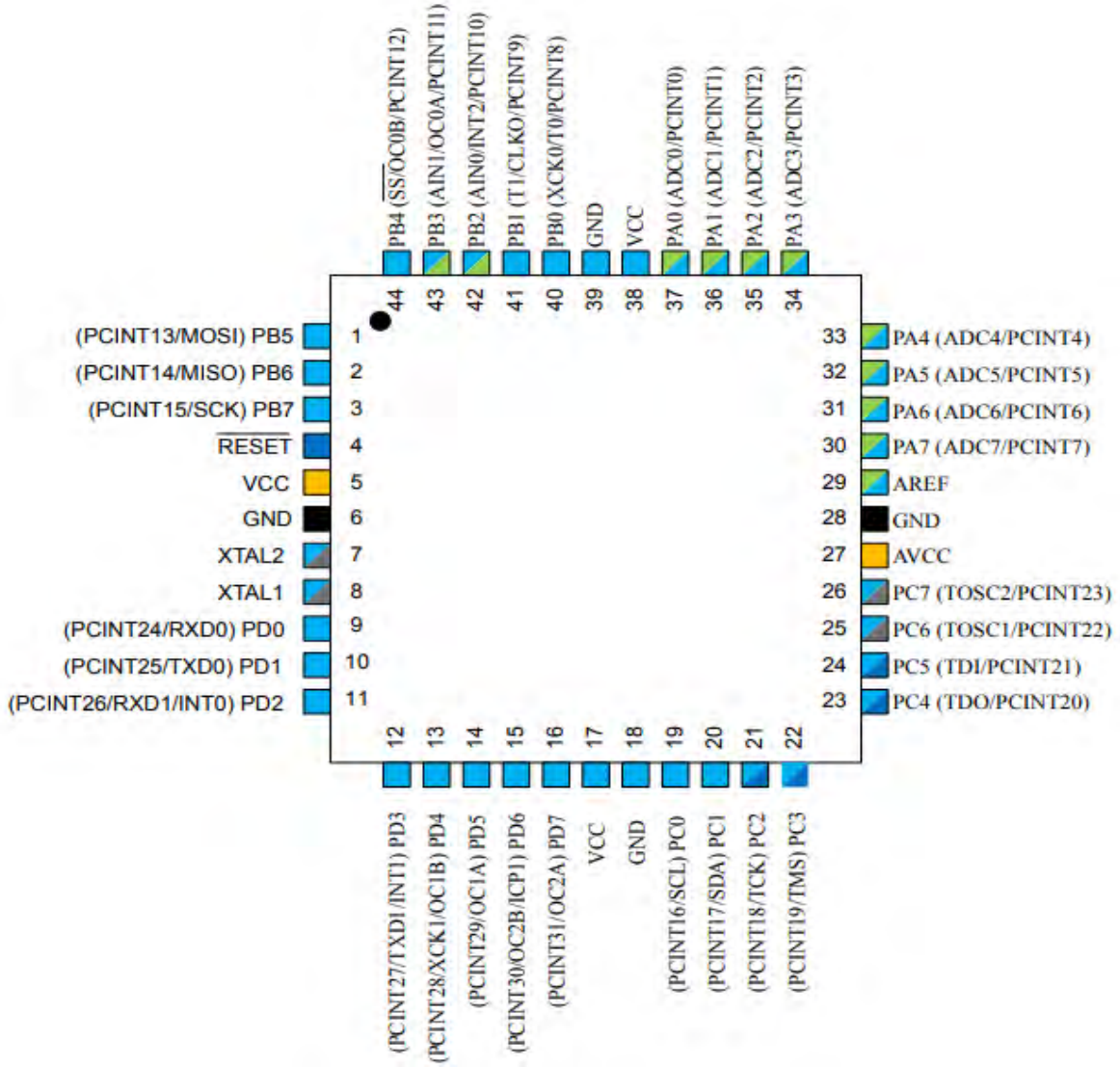
- Режим відключення живлення: 0,1 мкА.

- Режим економії енергії: 0,6 мкА (включаючи 32 кГц RTC).

Види корпусів для Atmega324P:



Малюнок 6.7 Корпус PDIP для ATmega324P



Малюнок 6.8 Корпус TQFN і QFN для ATmega324P

Малюнок 6.9 Позначення ніжок

6.5 Розрахунок і створення програми для мікроконтролера

Основне завдання мікроконтролера це вимірювання і порівняння частоти. Тому дана програма базується на використані трьох таймерів/лічильників. Нульовий 8-бітний таймер/лічильник рахує кількість зростаючих фронтів поданих на вхід T0. Перший 16-бітний таймер/лічильник, також рахує кількість зростаючих фронтів на вхід T1. Другий 8-бітний таймер/лічильник рахує 256 бітів і з заданою частотою.

Для того щоби написати програму, для початку треба зробити деякі розрахунки:

Розрахунок для МК

$f_etal := 12 \cdot 10^{3}$ Гц -еталона частота

$f_proc := 16 \cdot 10^{6}$ Гц –частота процесору

Період одного імпульса еталоного сигналу:

$$T_etal := \frac{1}{f_etal} = 8.333 \times 10^{-5} \text{ с}$$

Період тактового процесору:

$$T_proc := \frac{1}{f_proc} = 6.25 \times 10^{-8} \text{ с}$$

Частота рахування одного біта другого 8-бітного таймера:

$$f_2 := \frac{f_proc}{1024} = 1.563 \times 10^{4} \text{ Гц}$$

Період рахування одного біта другого 8-бітного таймера:

$$T_2 := \frac{1}{f_2} = 6.4 \times 10^{-5} \text{ с}$$

Період вимірювання :

$$T_2all := (T_2) \cdot 255 = 0.016 \text{ с}$$

Відносна похибка при лічбі імпулісів сигналу частотою 12кГц, на протязі часу T_2all

$$\delta := \frac{T_etal}{T_2all} \cdot 100 = 0.511 \text{ \%}$$

Максимальна кількість імпульсів яку можна нарахувати на нульвому таймері це 25

$\frac{T_2all}{T_etal} = 195.84$ -приблизна кількість імпульсів яку нарахує нульовий таймер за період виміру

Вийшло що для процесору з частотою тактування 16 МГц, відносна похибка становить 0.511 %. А якщо брати процесор з частотою більше 16 МГц, то буде зростати відносна похибка, а якщо менше 16МГц, то буде збільшуватись ефект паразитного взаємної синхронізації генераторів. Тому між цими значеннями треба знайти золоту середину. Отже на мій погляд найбільш оптимальною частотою виявився процесор з частотою тактування 16 МГц.
При необхідності можна змінити алгоритм дискримінації, зменшити тактову частоту мікроконтролера і зробити період вимірювання довшим, оскільки в середньому людина переміщує котушку в одну сторону за 0.25-1 с, а в нас період вимірювання 0.016 с.

Програма для порівняння кількості імпульсів двох сигналів за один і той самий період вимірювання написана на мові С для мікроконтролера Atmega324P, окрім цього в даній програмі передбачено калібрування, при натисканні кнопки. А також реалізовано два дешифратора для візуальної індикації на семисегментний цифровий індикатор.
Працюючу програму продемонстровано у **додатку 1**.

Принцип роботи:

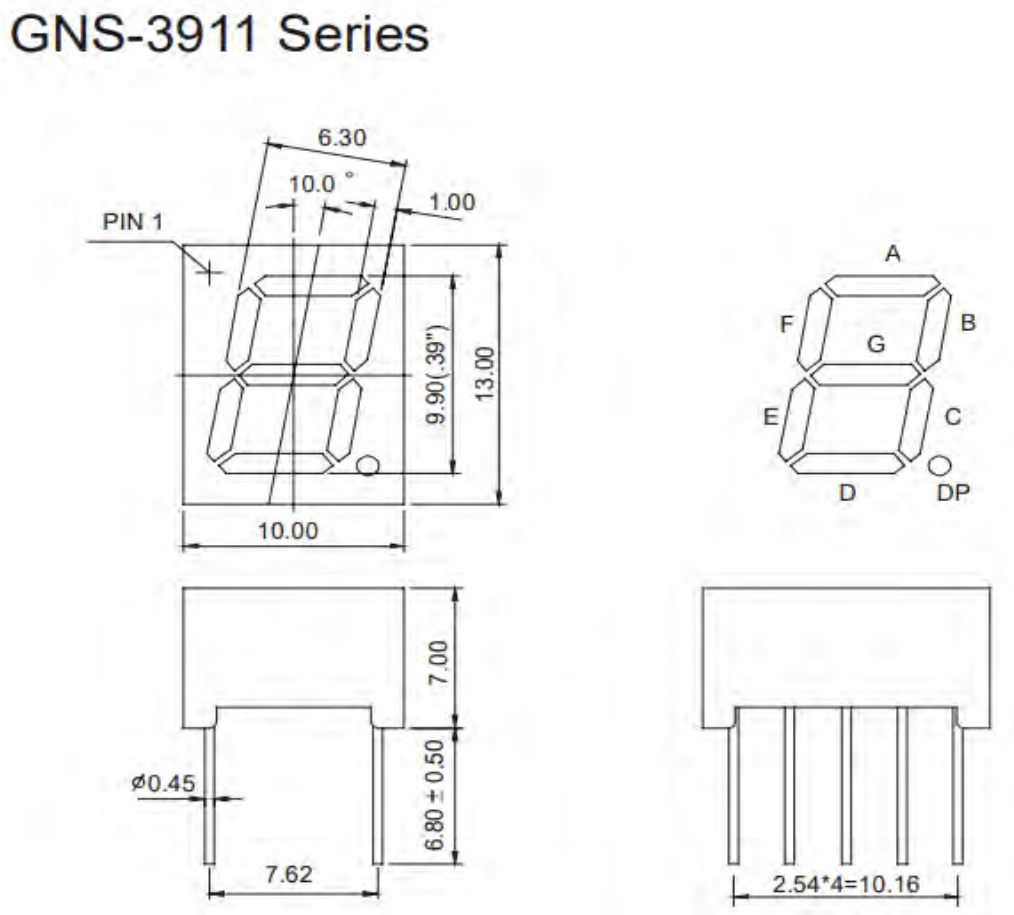
Нульовий 8-бітний таймер/лічильник рахує кількість зростаючих фронтів з входу T0 і одночасно з ним 16-бітний таймер/лічильник також рахує кількість зростаючих фронтів з входу T1. Після того, як другий 8-бітний таймер/лічильник порахує 255 бітів, порівнюються значення нульового і першого таймера/лічильника, і залежачи від того яка різниця між ними будет відображений відповідний сектор. Після індикації, значення усіх

таймерів/лічильників обнуляються і процедура повторюється. Також, якщо натиснута кнопка, то до еталонної кількості імпульсів додається значення BG. Її треба натискати, коли котушка знаходиться над поверхнею чистого ґрунту(тобто без металічних об’єктів), і мінімум через 0.016 с знову її натиснути. Після цього прилад налаштується під ґрунт пошуку, і можна проводити пошуки.

Код для прошивки мікроконтролера ATmega324P продемонстровано у **додатку 2**.

6.6 Вибір індикаторів

В якості візуального індикатора було обрано два семигементних індикатора GNS-3911BD.



Малюнок 6.10 Геометричні розміри семисегментного цифрового індикатора GNS-3911BD

Максимальне споживання 20 мА.

Необхідне живлення 1.8 В.

В якості звукового індикатора було обрано KP2036SP3.

Малюнок 6.11 KP2036SP3

Зовнішній діаметр: 20 мм.

Висота: 3.8 мм.

Маса: 2 грами.

Температура при якій може працювати динамік: -20 °C …+70 °C.

Температура зберігання: -30 °C …+70 °C.

Відносна вологість при якій може працювати динамік: 25%-85%.

Тиск при якому працює динамік 860-1060 мбар.

Імпеданс: 8 Ом ± 15%

Рівень звукового тиску: 90 Дб ± 3Дб.

Резонансна частота: 900 Гц ± 20%

Максимальна частота : 20 кГц.

Максимальна вхідна потужність: 1 Вт.

6.7 Вибір інших комплектуючих для металошукача

В якості штанги для даного металошукача рекомендую взяти телескопічну 3-х секційну універсальну штангу.

Малюнок. 6.12 Штанга

Малюнок 6.13 Штанга

Малюнок 6.14 Штанга

Нижня частина штанги телескопічна висувна, дозволяє регулювати висоту штанги.

Дві верхні частини штанги виготовлені з твердого алюмінію, покритого порошковою емаллю, нижня частина - з міцного склопластику, який не прогинається під вагою котушки. Якісні з'єднувачі, секції штанги з'єднуються затяжний муфтою.

Підлокітник виготовлений з нержавіючої сталі, з гумовими вкладишами, розрахований на передпліччя будь-яких "габаритів".

На цю штангу можна прикріпити в довільному корпусі створену плату для металошукача.

7. Висновок

Результатом даного проекту став розроблений металошукач, в якому спроектовано:

1.Алгоритм дискримінації оснований на вимірювання кількості імпульсів за визначений період вимірювання.

2. 20 секторів дискримінації.

3. Функція калібрування або баланс ґрунту.

4. Робоча частота 12 кГц.

Переваги спроектованого приладу:

1. Низьке енергоспоживання(приблизно 250 мА).
2. Невелика собівартість.
3. Універсальна частота.
4. Можливість апгрейду програмного забезпечення, що дозволяє розширити функціонал даного приладу.
5. Мобільний.

Недоліки:

1. Чутливий до електромереж.

Даний прилад можна використовувати у неруйнівному контролі, пошуку металевих вибухових пристроїв, закопаних труб, археологічних розкопках тощо.

8.Список використаної літератури

1. Новые металлоискатели для кладов и реликвий Щедрин А.И. 2003.
2. Как работает NE555N? веб-сайт. URL: https://www.youtube.com/watch?v=wHZL9_k5IO0
3. Какие бывают катушки для металлоискателя. веб-сайт. URL: https://md-arena.com/kakie-byvayut-katushki-dlya-metalloiskatelya/
4. G. Overton, C. Moreland, Inside the Metal Detector, Geotech Press, 2012.
5. Technika wiroprądowa w badaniach nieniszczących, zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1993.
6. B. Liu, The research of metal detectors using in food industry, Electronics and Optoelectronics (ICEOE), 2011 International Conference, tom 4, 29-31.07.2011.
7. P. Szyngiera, Konstrukcje sond detektorów. веб-сайт. URL: http://www.proscan.gliwice.pl.
8. B. Candy, MINELAB, Metal Detector basics and theory. Веб-сайт. URL: https://www.minelab.com/__files/f/11043/KBA_METAL_DETECTOR_BASICS_&_THEORY.pdf
9. P. Szyngiera, A Method of Metal Objects Identification by Electromagnetic Means, Instytut Elektroniki, Politechnika Śląska, 2010.
10. Металлоискатель по принципу частотомера. Веб-сайт. URL: https://www.qrz.ru/schemes/contribute/constr/metaldetector/
11. Металлоискатель забава М1. Веб-сайт. URL: http://www.sdelai-sam.su/zabava-m1.html
12. A.Chtchedrine, Y.Kolokolov , Frequency Meter Metal Detector, Circuit Cellar Magazine N130, May 2001.

13. История создания металлоискателей: истоки. Веб-сайт. URL: https://www.mdregion.ru/o-kladoiskatelstve/27-nowosti-poiska/3452-istoria-sozdania-metalloiskatelei-chast-1.html

14. Высокопроизводительные 8-разрядные RISC микроконтроллеры семейства AVR. Веб-сайт. URL: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/ic/Atmel/micros/avr/start.htm

15. Подключения динамика к микроконтроллеру. Основные способы. Веб-сайт. URL: https://microtechnics.ru/podklyuchenie-dinamika-k-mikrokontrolleru/

16. Семигментний індикатор GNS-3911BD Веб-сайт. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/GNS-3911Ax-Bx-Cx-Dx.pdf

17. ATMega324P Веб-сайт. URL: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42743 ATmega324P_Datasheet.pdf