

Дискримінація металів у металошукачах

Цимбал О. В.

e-mail olexandr.tsymbal97@gmail.com

Факультет електроніки fel.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» www.kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—У статті розглянуто основні принципи детектування металів, запропоновано методи для виміру величин, по яких можна визначити тип металу, методи підвищення точності детектування та класифікації металів. Розроблено апаратну реалізацію блоку обробки й аналізу даних для визначення типу металу. Для реалізації використані цифрові засоби обробки даних, що дозволило спростити конструкцію блоку, мінімізувати можливі похибки й шуми при вимірюванні, що спотворюють кінцевий результат детектування й класифікації металів.

Бібл. 12, рис. 8.

Ключові слова — металошукач; дискримінація; фазовий детектор; зсув фаз; цифрова обробка сигналів.

I. ВСТУП

Оскільки в сучасному світі доводиться стикатися із великою кількістю різних металів, постає проблема вирішення одного типу металу від усіх інших. Така функція металошукачів називається дискримінація. Дискримінація металошукача (metal detector discrimination – англ.) – функція, що дозволяє розпізнавати помічені об'єкти по типу металу та класифікувати їх [1].

Сучасні високоточні металошукачі містять у собі велику кількість функціональних блоків, складні в налаштуванні й використанні, чутливі до завад, обумовлених навколишнім середовищем.

Задача полягає в розробці блоку для дискримінації металів, що складався б із мінімальної кількості функціональних вузлів, потребував мінімальну кількість налаштувань і міг давати коректну інформацію про наявність і тип металу в незалежності від завад, обумовлених навколишнім середовищем.

II. БАЗОВІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ МЕТАЛОШУКАЧА

Металошукачі працюють за принципом генерування магнітного поля і аналізу зворотного сигналу від металевго об'єкта і середовища. Передане магнітне поле змінюється в часі. Передавач виконаний у вигляді котушки з електричним струмом певної форми, що проходить через неї і отримується з блоку генератора. Приймач виконаний у вигляді приймальної котушки, що підключена до блоку підсилення, фільтрування і обробки отриманого сигналу (рис.1).

Змінне магнітне поле, що передається, призводить до виникнення електричних струмів у металевих предметах. Ці електричні струми мають природу вихрових струмів [2], які, у свою чергу, створюють власне магнітне поле. Результуюче магнітне поле відрізняється від, того що передається. Це поле детектується

приймальною котушкою і далі обробляється необхідними блоками.

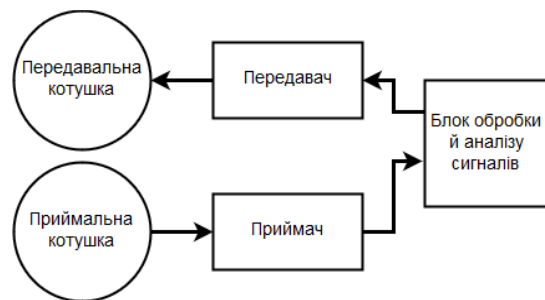


Рис.1. Блок-схема металошукача.

Наявність підсилювача обумовлена тим, що отриманий сигнал має дуже малу амплітуду. Для подальшої коректної обробки необхідно підсилити отриманий сигнал.

Алгоритм роботи металошукача:

- 1) згенерований сигнал надсилається на котушку передачі, в якій викликає появу електричного струму;
- 2) електричний струм в котушці передачі викликає магнітне поле;
- 3) прийомна котушка виявляє магнітне поле, що генерується вихровими струмами. У результаті в ній виникає електричний струм;
- 4) сигнал від приймальної котушки підсилюється, фільтрується та обробляється.

Отриманий сигнал є аналоговим сигналом, який можна представити як комбінацію дійсної і уявної частини комплексного числа:

$$S(t) = A_1(t) \cos(\omega t) + j A_1(t) \sin(\omega t), \quad (1)$$



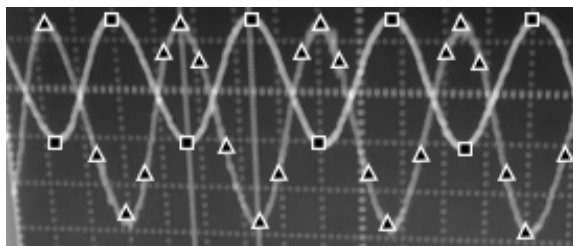


Рис.2. Відправлений (■) та прийнятий(▲) сигнали у випадку проведення над котушками бронзовим злитком.

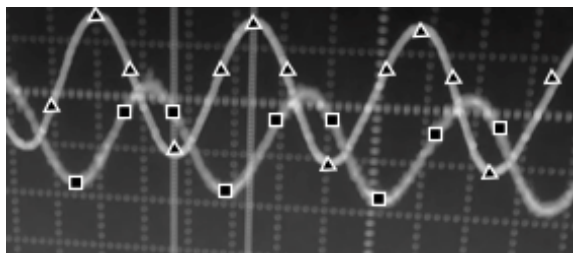


Рис.3. Відправлений (■) та прийнятий(▲) сигнали у випадку проведення над котушками залізним злитком.

де $S(t)$ – вхідний сигнал; $A_1(t)$ – амплітуда сигналу у визначений момент часу t ; ω – кутова швидкість вхідного сигналу у рад/с; t – момент часу.

Оскільки будь-який метал має властивості резистивності і властивості індуктивності, то отриманий сигнал від металу можна розкласти на дві складові [3]:

Квадратурна складова має ту ж саму форму сигналу, що й сигнал передачі, але в міру індуктивності цілі, отриманий сигнал зміщений в часі відносно переданого сигналу (різниця фаз). Ця компонента називається X.

Синфазна складова також має ту ж саму форму сигналу, що й переданий сигнал, але в міру резистивності цілі змінюється амплітуда отриманого сигналу. Ця компонента називається R.

Отже, можна зробити висновок, що необхідно вимірювати зсув фаз між відправленим і отриманим сигналом, і амплітуду отриманого сигналу (рис.2, 3).

Будь-який метал має свої властивості резистивності й індуктивності, тому по цих показниках можна точно визначити тип металу.

Приймальна котушка зазвичай вмикається у схему паралельного LC-контур (рис.4), для того щоб виділити корисний сигнал з несучою частотою, рівною частоті сигналу, що передається [4].

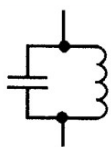


Рис.4. Паралельний LC-контур

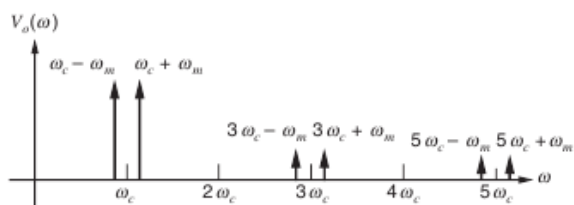


Рис.5. Спектр сигналу з приймальної котушки.

Частота резонансу для такого контуру визначається за формулою (2):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{L^2}}, \quad (2)$$

де f_0 – частота резонансу паралельного LC – контуру; L – результуюча індуктивність приймальної котушки і металевого об'єкта; C – ємність, включена паралельно приймальній котушці; r – величина, що спричинена затуханнями вихрових струмів.

Аналізуючи формулу (2), можна зробити висновок, що отриманий сигнал буде мати певні відхилення у частоті по відношенню до несучої в міру непостійності параметру r . Такі відхилення будуть становити 5-10 Гц в обидві сторони від несучої частоти [5]. Ілюстрація цього явища зображена на рис.5.

На рис. 5: $V_0(\omega)$ - вихідний сигнал з приймальної котушки, ω_c - несуча частота, ω_m - модулюючий сигнал.

III. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ

З існуючих методів детектування зсуву фази можна виділи два основних:

- 1) використання схеми синхронного детектора [6],
- 2) використання можливостей цифрової обробки сигналів для визначення сигналів X і R і подальшої їх обробки [7].

Використання першого методу має ряд обмежень: потрібно подавати два сигнали на вхід детектора – опорний (зсунутий по фазі на 90° відносно сигналу, що передається на котушку) і інформативний сигнал. Причому сигнали повинні мати однакову частоту і амплітуду. Оскільки частота отриманого сигналу може відрізнятись від переданого сигналу, це буде вносити похибку в детектування фази сигналу. Також досягнення однакової амплітуди обох сигналів потребує додаткових схематехнічних рішень, що призводить до збільшення кількості елементів і як результат зменшення надійності роботи пристрою в цілому.

Використання другого методу полягає в застосуванні АЦП (аналогово-цифровий перетворювач) для зняття дискретних відліків отриманого сигналу, а далі обраховувати ортогональні складові компоненти X і R за допомогою квадратурних складових [3]. Використання фактично одного з вимірювальних

каналів у вигляді одного АЦП дає змогу не тільки здешифувати систему виміру фазових зсувів сигналів, але і підвищити точність отриманого результату при відповідних вимірах.

IV. МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ЗСУВУ ФАЗ

Обрано метод визначення зсуву фаз з використанням АЦП і обрахуванням ортогональних складових сигналу R і X. Формули для обрахунку [7]:

$$R = \sum_{n=0}^{N-1} A_i(n) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot t(n)), \quad (3)$$

$$X = \sum_{n=0}^{N-1} A_i(n) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot t(n)), \quad (4)$$

де $A_i(n)$ – вибірка вхідного сигналу; f_R – частота сигналу, що передається; $t(n)$ – дискретний відлік часу, що відповідає вибірці вхідного сигналу.

У результаті отримуємо R, як дійсну частину комплексного числа, а X – уявну частину. Можна відобразити це в полярній системі координат (рис.6.):

Фазу сигналу, що розкладений на активну (R) і реактивну складові (X) знаходимо за формулою (5):

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} \quad (5)$$

де φ – фаза отриманого сигналу по відношенню до відправленого в рад/с.

Для того, щоб отримати фазу в градусах, скористаємося співвідношенням (6):

$$\varphi(\text{deg}) = \varphi \cdot \frac{180}{\pi} \quad (6)$$

Амплітуду отримуємо із формули:

$$A = \sqrt{X^2 + R^2}, \quad (7)$$

де A – амплітуда у Вольтах.

Вибірку сигналів доцільно проводити по періоду сигналу, що зчитується, оскільки це зменшує випадкову похибку. Можна проводити вибірку сигналів по напівперіоду, при цьому похибка буде збільшуватися обернено пропорційно квадратному кореню із числа відліків [8], а збільшення вибірки призведе до уповільнення опрацювання вхідного сигналу.

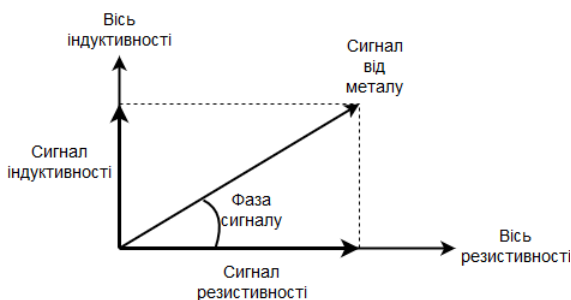


Рис.6. Сигнали R(Conductive Axis) і X(Magnetic Axis) в полярній системі координат.

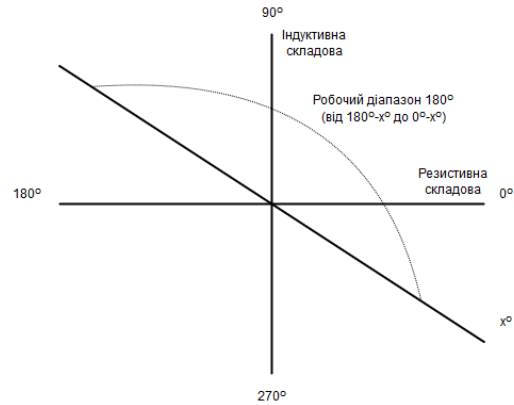


Рис.7. Полярна система зсунута відносно початку координат на x градусів внаслідок калібрування по ґрунту.

Синхронізація роботи АЦП відбувається сигналом, що передається, тобто фаза отриманого сигналу буде відкладатися від початку координат, відносно 0° .

В металошукачах потрібно враховувати той факт, що у ґрунті, в якому відсутній метал (ціль пошуку), присутні мінерали, що містять різні окисли металів. Ґрунт без металевого об'єкту в ньому буде давати вхідний сигнал вже зсунутий на певну фазу відносно сигналу, що передається, а також матиме певну амплітуду. Тому перед використанням металошукача із даним методом отримання результатів, необхідно спочатку провести його калібрування, коли в ґрунті немає металу. Зчитані дані необхідно запам'ятати і при кожному новому обрахуванні віднімати амплітуду і фазу отримані від калібрування «по ґрунту». Таким чином отримуємо полярну систему координат, повернуту на величину зсуву фази, що генерується ґрунтом (рис.7.):

Також потрібно провести калібрування «по фериту». Це необхідно, тому що експериментально встановлено – метали, що містять залізо даватимуть зсув фази вхідного сигналу по відношенню до вихідного сигналу від -90 до 0 градусів. А метали, що близькі до ідеальних провідників (срібло, золото) даватимуть зсув фаз від 0 до 90 градусів. Це пов'язано з тим, що залізовмісні елементи мають більшу індуктивність, як результат сигнал буде мати негативний зсув фаз. Для інших металів індуктивність менша резистивної складової, а отже результуючий зсув буде позитивним. Для того щоб зсув фаз отриманого сигналу і переданого відкладати від 0 градусів, необхідно провести калібрування по фериту. Від фериту отримуємо найбільш негативний зсув фаз близький до -90 градусів, оскільки цей матеріал не має провідних властивостей, а містить лише індуктивну складову. Приймаємо зсув фаз, який отримуємо від фериту, поміщеного в поле передавача й приймача, за умовний нуль. Як результат маємо, що залізовмісні метали даватимуть відносний зсув фаз від 0 до 90 градусів, а не залізовмісні – від 90 до 180 градусів.



Рис.8. Блок-схема обробки вхідного сигналу.

V. БЛОК-СХЕМА ОБРОБКИ ВХІДНОГО СИГНАЛУ

Вимірювання проводяться за допомогою АЦП. Для зменшення похибки вимірювань необхідно дискретизувати дані із великою частотою і квантувати з великою розрядністю. Виходячи з того, що для пошуку металу і його класифікації необхідний генератор сигналу, що передається, а також пристрій для виведення отриманих значень, доцільно використувати мікроконтролер, який би містив у собі всі необхідні блоки (АЦП, генератор сигналів, блок обчислення, блок індикації). Для реалізації дослідного зразка обрано мікроконтролер серії STM32F407, який містить у собі 12-ти бітний АЦП, необхідну кількість таймерів, володіє великими обчислювальними можливостями [9].

Блок-схема обробки вхідного сигналу наведена на рис.8.

Функціональний опис окремих блоків:

- Генератор сигналів – реалізований за допомогою вбудованого в мікроконтролер таймера. На виході отримуємо широтно-імпульсно модульований (ШИМ) сигнал, коефіцієнт заповнення якого можна змінювати. Доцільність такого рішення обумовлена тим, що основна інформація сигналу (тобто частота несучої, амплітуда) буде міститися на першій гармоніці ШИМ сигналу. Частота першої гармоніки буде рівна частоті несучої. Похибка, що з'являється в результаті більш високочастотних гармонік, нехтовно мала в порівнянні із завадами, які генеруються навколишнім середовищем.
- Підсилювач потужності сигналу генератора необхідний для того, щоб передавати в котушку струм, необхідний для створення сильного магнітного поля. Реалізований по типовій напів мостовій схемі включення.
- Вхідний підсилювач реалізований з використанням операційного підсилювача з частото залежним негативним зворотнім зв'язком, що розраховується для частоти сигналу, що передається. Такий підсилювач одночасно є смуговим фільтром, що дозволяє на початковій стадії не пропустити високочастотні завади у наступні блоки обробки. Коефіцієнт підсилення вибирається рівним 60, оскільки

вхідний сигнал може мати амплітуду декілька десятків мілівольт, а при живленні операційного підсилювача рівному 3 В, динамічний діапазон вихідного сигналу операційного підсилювача рівний 1,5 В (максимальна напруга на виході 3 В – значення напруги «середньої точки» 1,5 В). Отже при амплітуді вхідного сигналу 25 мВ, на виході підсилювача буде значення напруги рівним значення напруги «середньої точки» $1,5 \text{ В} + 25 \text{ мВ} \cdot 60 = 3 \text{ В}$.

- Антиаліасинговий фільтр необхідний для підвищення точності АЦП, оскільки він видаляє зі спектру сигналу усі гармоніки, що вище половини частоти дискретизації [10] (половина частоти дискретизації – максимальна, за теоремою Найквіста-Шеннона [11], частота сигналу для його коректної дискретизації).
- АЦП – для розширення точності квантування сигналу використаний прийом передискретизації (oversampling – англ.) [12]. Дані відцифровуються з частотою 16 вибірок на період сигналу. У результаті отримуємо частоту дискретизації:

$$f_{\text{sampling}} = f_{\text{signal}} \cdot n, \quad (8)$$

де f_{sampling} – частота дискретизації; f_{signal} – частота вхідного сигналу; n – кількість вибірок на період.

Для підвищення точності для отримання одного значення результату береться вибірка вхідного сигналу. Як наслідок – результати обчислень отримуються з частотою в 1000 разів менше, ніж частота дискретизації. Кількість додаткових бітів, що отримуються в результаті передискретизації можна отримати за формулою:

$$n_{\text{addbit}} = \log_4 1000 \approx 5, \quad (9)$$

де n_{addbit} – кількість додаткових біт, що отримуються внаслідок передискретизації.

У результаті отримуємо АЦП розрядністю 12 біт (апаратних) + 5 біт (передискретизації) = 17 біт. Значення молодшого значущого біта (LSB) дорівнює (10):

$$LSB = \frac{\max \text{ range}}{2^{17}} = \frac{3 \text{ В}}{2^{17}} \approx 22 \text{ мкВ} \quad (10)$$

Враховуючи похибку АЦП – 2-3 LSB не є значущими [9], тому сумарна похибка внесена АЦП при квантуванні не перевищуватиме 150 мкВ.

- Блок обчислень містить у собі на вході цифровий фільтр високих частот першого порядку для того, щоб відокремити постійну складову відцифрованого сигналу. Також далі сигнал подається на цифровий смуговий фільтр Бесселя першого порядку, необхідний для того, щоб відокремити високочастотні складові сигналу, обумовлені наведеннями навколишнього середовища. Відфільтрований сигнал розкладається на X і R складові, далі обраховується різниця фаз отриманого і відправленого сигналів з урахуванням калібрування «по ґрунту» і «по фериту».
- Дисплей відображає отримане значення різниці фаз.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У роботі проаналізовано принцип роботи металозукача, встановлено, що для пошуку та класифікації металу, необхідно вимірювати зсув фаз між надісланим та отриманим сигналом. Запропоновано можливі підходи вимірювання необхідної величини, можливі джерела похибок. Розроблено методи компенсації похибок і підвищення точності детектування і дискримінації металів.

Розроблено систему, що здатна детектувати й розрізняти метали з прийнятною точністю, проста в реалізації, налаштуванні й використанні. Подальше удосконалення системи можливо за рахунок збільшення швидкості обробки даних, застосуванням фільтрів з кращими амплітудо-частотними і фазочастотними характеристиками.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] “Diskriminaciya metalloiskatelya. Princip diskriminacii metallov,” *Metal Detecting 911*. [Online]. Available:

Надійшла до редакції 10 квітня 2019 р.

- <https://md911.blogspot.com/2013/03/diskriminatsiya-metalloiskatelya.html>. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [2] Neyman L.R., Kalantarov P.L. “Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki. CHast' 3. Teoriya ehlektromagnitnogo polya [Theoretical foundations of electrical engineering. Part 3. Theory of the electromagnetic field]”. 5-th ed., — M.-L.: Gosehnergoizdat, 1959. — 232 p.
- [3] “Sinfaznaya i kvadrurnaya sostavlyayushchie signala,” *Wikipedia*, 13-Dec-2018. [Online]. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/Синфазная_и_квадратурная_составляющие_сигнала. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [4] “Metal detector basics and theory.” [Online]. Available: <https://www.ncmd.co.uk/wp-content/uploads/ncmd-how-a-metal-detector-works.pdf>. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [5] Paul R. Gray, Robert G. Meyer, “Analysis and design of analog integrated circuits, - 5th ed.p. cm”. New York : Wiley, 683 p. ISBN 978-0-470-24599-6.
- [6] “Amplitudno-fazovyy metod.” [Online]. Available: <https://helpiks.org/7-5934.html>. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [7] Bazhenov V.G., Bogdan G.A., Kravchenko M.V., “CIFROVAYA SISTEMA IZMERENIYA FAZOVYH SDVIGOV RADIOIMPUL'SNYH SIGNALOV”. [DIGITAL SYSTEM OF MEASUREMENT OF PHASE SHIFTS OF RADIO IMPULSE SIGNALS]”, DOI: [10.18454/IRJ.2227-6017](https://doi.org/10.18454/IRJ.2227-6017)
- [8] “Pogreshnost' izmereniya,” *Wikipedia*, 29-Jan-2019. [Online]. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/Погрешность_измерения. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [9] “RM0090 Reference manual.” [Online]. Available: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/file_s/DM00031020.pdf?cr=content/translations/en.DM00031020.pdf. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [10] “Terminologiya: fil'tr antialajzjgovyy.” [Online]. Available: http://www.lcard.ru/lexicon/antialias_filter. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [11] “Teorema Kotel'nikova,” *Wikipedia*, 31-Mar-2019. [Online]. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Котельникова. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [12] P. Bobkov, “AVR121: Povyshenie razresheniya ACP s pomoshch'yu oversamplinga ch1,” *chipenable.ru*. [Online]. Available: <http://chipenable.ru/index.php/programming-avr/141-avr121-oversampling-decimation.html>. [Accessed: 10-Apr-2019].

УДК 53.087.92

Дискриминация металлов в металлоискателях

Цимбал О. В.,

e-mail olexandr.tsymbal97@gmail.comФакультет электроники fel.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» www.kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—У статье рассмотрены основные принципы детектирования металлов, предложены методы для измерения величин, по которым можно определить тип металла, методы повышения точности детектирования и классификации металлов. Разработана аппаратная реализация блока обработки и анализа данных для определения типа металла. Для реализации использованы цифровые средства обработки данных, что позволяет упростить конструкцию блока, минимизировать возможные ошибки и шумы при измерении, искажающие конечный результат детектирования и классификации металлов.

Библ. 12, рис. 8.

Ключевые слова — металлоискатель; дискриминация; фазовый детектор; сдвиг фаз; цифровая обработка сигналов.

UDC 53.087.92

Metal Discrimination in Metal Detector

O. V. Tsymbal,

e-mail olexandr.tsymbal97@gmail.comFaculty of Electronics fel.kpi.uaNational technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute» kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—In the article show the basic principles of metal detection, proposed methods for measuring the quantities by which the type of metal can be determined, and methods for improving the accuracy of metal detection and classification. A hardware implementation of a data processing and analysis unit for determining the type of metal has been developed. Digital data processing tools were used for the implementation, which allows to simplify the block design, minimize possible errors and noises during measurement, distorting the final result of the detection and classification of metals.

In the modern world people has to deal with a large number of different metals. There is a problem of distinguishing one type of metal from all others. Such a function of metal detectors is called discrimination. Metal Detector Discrimination is a function that allows you to recognize marked objects by metal type and classify them. Modern high-precision metal detectors contain a large number of functional blocks, complex in setting up and use, sensitive to noise and errors during measurement and detecting metal. The task is to design a unit for discrimination of metals that would consist of a minimum number of functional units, required minimum number of settings and could give correct information about the presence of metal and type of metal and will be insensitive to disturbances caused by the noise and errors during measurement.

Metal detectors operate on the principle of magnetic field generation and analysis of the feedback signal from a metal object and the environment. The transmitted magnetic field varies in time. The transmitter is made as coil with an electric current of a certain shape, passing through it and obtained from the generator block. The receiver is made as receiving coil connected to the amplification, filtering and processing unit of the received signal. Any metal has the properties of the resistivity and the properties of the inductance. Using information about the phase difference and amplitude between transmitted and received signals, we can determine type of the metal. To find the phase and amplitude of the received signal, the signal from the metal can be divided into two components: quadrature component has the same form of signal as the transmission signal, but is shifted in time relative to the transmitted signal (phase difference); in-phase component has the same form of signal as the signal transmitted, but, the amplitude of the received signal changes. Then using this two components find the phase and amplitude of the signal. To increase accuracy of the measurement using “ground balancing” principals, and ferrite calibration. As a result get the block for metal discrimination with simple design, minimum number of setting and good capabilities to minimize noise and errors during measurement.

Ref. 12, fig. 8.

Keywords — metal detector; discrimination; phase detector; phase shift; digital signal processing.

