

ОТКРЫТИЯ ПРОШЛОГО НА СТРАЖЕ НАСТОЯЩЕГО. КОНСТРУКЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЕЙ

Буйневич Д.А., Языков С.К., Соловей А.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Савилова Ю.И. – к.т.н., доцент, доцент кафедры физики

Аннотация. В данной статье изучены эксперименты великих физиков из прошлого, с электромагнитными волнами. Рассмотрены принципы работы современных металлодетекторов. Описаны варианты их схем. Приведены примеры их использования в интересах людей.

Ключевые слова: металлоискатель, электромагнетизм, электромагнитное поле, электромагнитная индукция, закон Ленца, закон Био–Савара–Лапласа, индуктивность, соленоид, вихревые токи, индукционный баланс, методы обнаружения металлов, BFO (Beat Frequency Oscillator), IB (Induction Balance), PI (Pulse Induction).

Введение. Сложно представить себе современный мир без норм общественной безопасности. Мы встречаемся с ними каждый день, когда спускаемся в метро и видим работников службы безопасности, которые не допускают проноса опасных для людей вещей. Когда посещаем массовые мероприятия с большим скоплением людей, где на входе, сотрудники милиции проводят осмотр граждан, на предмет хранения запрещённых к проносу предметов. Даже, когда идем в магазин, на входе нас встречают рамки “Антикражи” недопускающие выноса неоплаченного товара. Во всех приведённых случаях применяются устройства, реагирующие на изменение электромагнитного поля внутри себя. Данные устройства несут свою доблестную службу в различных органах безопасности не первый год, но как же они устроены?

Основная часть. Один из первых шагов к изобретению современного металлоискателя совершил датский физик Ханс Кристиан Эрстед. В 1820 году проводя обычное лекционное занятие, Эрстед подключил токопроводящий провод к источнику тока (вольтов столб), и заметил, как магнитная стрелка, расположенная рядом, дрогнула. Хотя сам Эрстед не вывел формулу, но современная физика описывает его опыт законом Био-Савара-Лапласа, формула 1:

$$\beta = \frac{\mu I}{2\pi r}$$

где μ – магнитная постоянная; I – сила тока в проводнике; r – расстояние до проводника; β – магнитная индукция

Таким образом, именно опыт Эрстеда, помог установить связь электричества и магнетизма.

Серьёзный прорыв в этих исследованиях совершил известный французский физик Андре-Мари Ампер. Не останавливаясь на экспериментах Эрстеда, он провёл несколько опытов, к примеру: пустил по двум параллельным проводам ток в одном направлении и заметил, что провода стали притягиваться, после чего, при изменении направления тока в одном из проводов, они стали отталкиваться. Во время проведения второго опыта, Ампер свернул провод в катушку (соленоид) и пустив по ней ток, заметил, что катушка повела себя как классический магнит. У неё появились северный и южный полюса. Таким образом Ампер подтвердил, что то что мы называем магнитом-это совокупность круговых токов внутри вещества.

В 1831 году английский физик Майкл Фарадей, загорелся идеей доказать, что раз ток создаёт магнитное поле, то и магнитное поле создаёт ток. Намотав катушку на токопроводящую сердцевину, у пустив по проводу ток, он стал передвигать внутри катушки магнит, в результате чего стрелка датчика (гальванометра) стала двигаться. В дальнейшем на основе этого опыта был составлен закон электромагнитной индукции, формула 2:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

где ε – ЭДС индукции в контуре, $\Delta\phi$ -изменение магнитного потока, Δt -время изменения.

В 1833 году Российский физик Эмилий Христианович Ленц фактически поставил точку в вопросе, оставленном Фарадеем, который заметил, что ток возникает при изменении магнитного поля, но не знал в какую сторону этот ток течёт. Ленц же увидел, что когда передвигаешь магнит внутри катушки вперёд, стрелка датчика идёт в одну сторону, когда магнит двигается назад, стрелка идёт обратно. Так он сформулировал свой закон: “Индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим магнитным полем противодействовать изменению магнитного потока, которое его вызвало”.

Финальный шаг к изобретению современного металлоискателя совершил в 1881 году Александр Грэм Белл. 2 июня 1881 президент США Джеймс Гарфилд получил два пулевых ранения. Врачи не могли найти, где именно находится пуля. Тогда Белл решил использовать для этого, устройство Дэвида Хьюза, построенное на принципе индукционного баланса: 2 катушки (передающая и принимающая), в нормальном состоянии сигнал на принимающей отсутствовал, но при появлении между ними металла, вторая катушка принимала сигнал. Белл подсоединил к ним провод от телефона, который подавал звуковой сигнал при появлении металла. Однако поскольку Гарфилд лежал на металлической кровати, пулю найти так и не удалось. Однако в результате этого случая был создан первый прототип металлоискателя.

Существует 3 основных схемы металлоискателей:

1 BFO-Beat Frequency Oscillator (метод биений)- В приборе расположены два генератора радиочастоты. Частота первого фиксированная, а в колебательный контур второго включена катушка-искатель. Если в поле катушки попадает цветной металл, её индуктивность падает, если чёрный металл, то растёт. Оба этих сигнала смешиваются на слух. При появлении металла, в наушниках слышны скачки (биения) звука вверх или вниз.

2 IB-Induction Balance (индукционный баланс)- В приборе две катушки, расположенные особым образом: либо крест на крест, либо одна в одной плоскости, а вторая сдвинута. Поля обеих катушек строго скомпенсированы, так, чтобы одна катушка наводила во второй 0 вольт. Как только под нами появляется металл, компенсация катушек сбивается, и вторая катушка падает сигнал.

3 PI-Pulse Induction (Импульсная Индукция)-Здесь только одна катушка, которая работает по очереди приёмником и передатчиком. Импульс создаёт поле, которое начинает затухать, при исчезновении импульса. Но металлические предметы создаёт вихревые токи, и поле от них затухает постепенно. Его и фиксирует катушка при переходе в режим приёма.

Разберём одну из возможных схем, которую несложно собрать вручную.

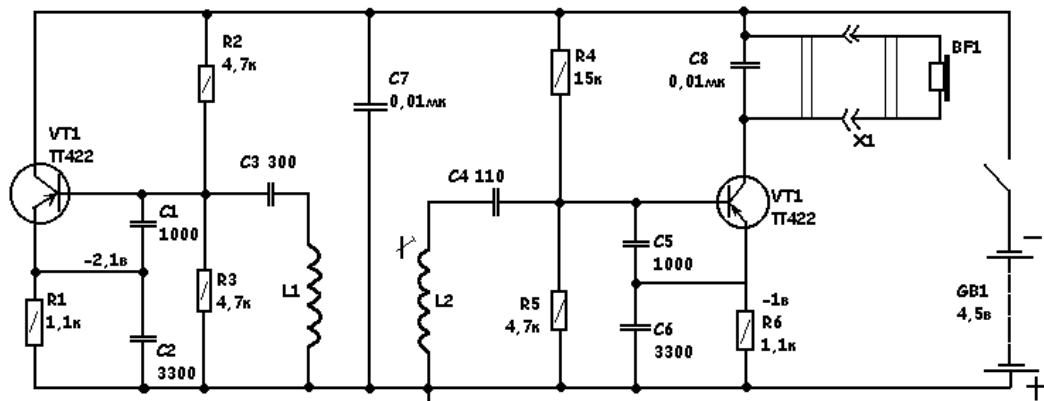


Рисунок 1 – Принципиальная схема металлоискателя

Это схема простого металлоискателя построенного на принципе индукционного баланса. Питание от батареи 4.5В и ток потребления 1.5мА, при обнаружении металла до 7мА. Состоит из двух катушек, каждая по 40 витков из провода диаметром 0.25мм на диэлектрический сердечник, для достижения частоты работы примерно 100кГц. В процессе работы индуктивности катушек приблизительно 1-2мГн. Левый транзистор VT1 совместно с катушкой L1 работают как высокочастотный генератор, создающий необходимые 100кГц, конденсаторы C1 и C2 определяют частоту генерации. Правый транзистор VT2 и катушка L2 работают как активный искатель, который и реагирует на металл. Сами транзисторы подключены так, чтобы стабилизировать изменение напряжения, при изменении свойств окружающей среды (температура, влажность и т.д.).

В нормальном состоянии ЭДС, наводимые катушками скомпенсированы, правый транзистор ток не пропускает, генератор высоких частот работает в резонанс. При появлении металла в поле катушек, в нем возникают вихревые токи. Эти токи создают своё поле, противофазное полю катушек. Магнитный поток через катушку L1 уменьшается, баланс пропадает. Появляется разница в ЭДС, частота высокочастотного генератора уменьшается, амплитуда сигнала в детектор (катушка L2 и правый транзистор) падает, правый транзистор начинает пропускать ток к динамику, звучит сигнал.

Преимущества данной схемы в том, что она проста в изготовлении, низкое энергопотребление, не требует сложной настройки. Например, изменяя сопротивление резисторов R1 и R6 мы можем изменять чувствительность и порог срабатывания.

Технология металлоискателя является крайне полезной в рамках специальности «Системы и сети инфокоммуникаций», на которой обучаются авторы данной статьи. Металлодетекторы могут быть использованы для трассировки подземных коммуникаций. Специализированные металлоискатели, имеющие название трассоискатели широко используются для поиска повреждений подземных кабелей связи по причине того, что оптоволокно часто имеет металлический трос или оплётку. Кроме того знание самих принципов металлодетектора значительно поможет при эксплуатации линий связи.

Заключение. Таким образом, созданный ещё в начале 20 века, металлоискатель по сей день надёжно стоит на страже и обороне нашей страны. Ещё во времена Великой Отечественной войны, он помогал сапёрам обнаруживать и обезвреживать минные заграждения. Благодаря нему, сейчас наши правоохранительные органы могут наиболее совершенно и полно обеспечивать нашу безопасность. А работники таможенных и пограничных служб гарантируют спокойствие граждан. Металлоискатель – это пример прибора, который прошёл путь от полей сражений до современных реалий, показав свою надёжность и безотказность, обеспечивая нам зону комфорта на вокзалах, в метро, на улице и во всех местах общественной важности. Технологии не стоят на месте и будем надеяться, что в этой отрасли они тоже будут шагать в ногу с потребностями современных реалий.

Список литературы

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. – М. : Наука, 1988. – 512 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2 : Электричество и магнетизм. – М. : Наука, 2003. – 432 с.
3. Гриффитс Д. Введение в электродинамику : пер. с англ. – М. : Бином, 2012. – 528 с.
4. Purcell E. M., Morin D. J. Electricity and Magnetism. – Cambridge : Cambridge University Press, 2013. – 821 p.
5. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. – Oxford : Clarendon Press, 1873. – 2 vols.
6. Faraday M. Experimental Researches in Electricity. – London : Royal Society, 1839. – 512 p.
7. Whittaker E. T. A History of the Theories of Aether and Electricity. – London : Longmans, Green and Co., 1951. – 480 p.
8. Серуэй Р. А., Джуэтт Дж. Физика для ученых и инженеров. Т. 2 : Электричество и магнетизм. – М. : Мир, 2014. – 624 с.
9. Bray D. Metal Detecting: Theory and Practice. – New York : McGraw-Hill, 1995. – 304 p.
10. Garrett C. Inside the Metal Detector. – Sweet Home : White's Electronics, 1987. – 198 p.
11. Ключев В. В. Методы неразрушающего контроля : учеб. пособие. – М. : Машиностроение, 2004. – 656 с.
12. Гусев Ю. П. Основы радиотехнических систем. – М. : Радио и связь, 2001. – 384 с.
13. Спасский Б. И. История физики. Т. 1. – М. : Наука, 1977. – 392 с.
14. Куржир П. Г., Самойлюкович В. А., Тесевич Б. И. Физика. Электричество и магнетизм : учеб.-метод. пособие. – Минск : БНТУ, 2015. – 216 с.
15. Бояришинова О. А. Электромагнетизм : метод. указания к практическим занятиям. – Минск : БНТУ, 2011. – 98 с.
16. Жданович А. А. Электромагнитные поля и волны : учеб. пособие. – Минск : БГУ, 2014. – 240 с.
17. Bryakin I. V., Bochkarev I. V., Khramshin V. R. Developing a Combined Method for Detection of Buried Metal Objects // Machines. – 2021. – Vol. 9, № 5. – P. 92–110.
18. Wilson B. A., Ledger P. D., Lionheart W. R. B. Identification of Metallic Objects using Spectral Magnetic Polarizability Tensor Signatures // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2021. – Vol. 59, № 11. – P. 9023–9040.
19. Elson L., Meraki A., Rushton L. M. Detection and characterisation of conductive objects using electromagnetic induction and a fluxgate magnetometer // Journal of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 198. – P. 104–121.
20. Металлоискатель (металлодетектор) // Большая российская энциклопедия : электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://bigenc.ru> (дата обращения: 24.02.2026).
21. Electromagnetic induction // Encyclopaedia Britannica : электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://www.britannica.com> (дата обращения: 24.02.2026).
22. IEEE Xplore Digital Library : электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org> (дата обращения: 24.02.2026).
23. SpringerLink : электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://link.springer.com> (дата обращения: 24.02.2026).
24. ScienceDirect : электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com> (дата обращения: 24.02.2026).
25. Национальная библиотека Беларуси : электрон. каталог. – Минск, 2026. – Режим доступа: <https://nlb.by> (дата обращения: 24.02.2026).
26. Патент США № 239,693. Apparatus for detecting metal / A. G. Bell. – Washington : U.S. Patent Office, 1881.

UDC 621.317.7:537.86

DISCOVERIES OF THE PAST GUARDING THE PRESENT. DESIGN AND APPLICATION OF MODERN METAL DETECTORS

Buinevich D.A., Yazykov S.K.,
Solovey A.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Minsk, Republic of Belarus
Savilova U.I. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of physics

Annotation. This article examines the experiments of great physicists from the past with electromagnetic waves. The operating principles of modern metal detectors are considered. Variants of their circuit designs are described. Examples of their use in the interests of people are provided.

Keywords: Metal detector, electromagnetism, electromagnetic field, electromagnetic induction, Lenz's law, Biot–Savart–Laplace law, inductance, solenoid, eddy currents, induction balance, metal detection methods, BFO (Beat Frequency Oscillator), IB (Induction Balance), PI (Pulse Induction).