

УДК 621.317.441

*П.В. Скороплетов, А.Я. Клочков*

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ФЕРРОЗОНДА В МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОИСКОВЫХ ПРИБОРАХ

*Рассмотрен тип магниточувствительных поисковых приборов. Проведен анализ основных характеристик данного типа приборов. Рассмотрены наиболее распространенные физические принципы построения магнитометров. Приведена схематическая конструкция феррозондового преобразователя, выполненного по дифференциальной схеме. Доказано практическое применение феррозондов в магниточувствительных поисковых приборах.*

**Введение.** Цель работы – рассмотреть типы магнитометров, выделить их достоинства и недостатки, проанализировать физические принципы их построения и конструктивные особенности.

Для поиска металлов в укрывающих средах – под землей, водой, снегом и т.д., используются несколько типов металлоискателей, отличающихся друг от друга прежде всего принципом действия – чувствительным элементом. Металлоискатели можно разделить на две основные группы: первая группа это индукционные (вихретоковые) металлоискатели, вторая группа – магниточувствительные металлоискатели. Индукционные металлоискатели позволяют обнаруживать любые проводящие предметы, скрытые непроводящей или слабопроводящей средой. Индукционные металлоискатели работают по следующему принципу – возбуждающей катушкой индуктивности, по которой протекает импульсный или периодический ток, наводят в искомом проводящем объекте вихревые токи и системой сигнальных катушек принимают сигнал от наведенных (индуцированных) в объекте токов. По описанному принципу индукционные металлоискатели можно считать активными приборами, то есть, оказывающими воздействие на объект поиска.

**Постановка задачи.** В данной статье мы сосредоточим свое внимание на магниточувствительных приборах, основное отличие которых от индукционных металлоискателей заключается в том, что эти устройства могут находить только ферромагнитные объекты. Ферромагнитные объекты обладают либо собственным магнитным полем, либо искажают однородное поле Земли, и в том и другом случае величина магнитного поля в зоне чувствительного элемента изменяет свою величину и направление. Это и является признаком ферромагнитного объекта. По отношению к искомому объекту эти приборы

являются пассивными, то есть не оказывают на объект никакого воздействия.

Рассмотрим основные параметры магнитометров.

**Решение задачи.** Самым главным параметром металлоискателя является его чувствительность, т.е. максимальная дальность обнаружения искомого предмета. При этом формализовать этот параметр, сделать его единым для всех металлоискателей практически невозможно и не только потому, что металлоискатели отличаются принципом действия, но и конструкцией преобразователей и функцией обработки сигнала, а также многообразием форм искомых предметов и свойств металлов. Для индукционных металлоискателей обычно используют в качестве эталонов чувствительности пластины круглой или квадратной формы из различных металлов и различных размеров. С помощью этих пластин можно сравнивать расстояния, на которых обнаруживают эти пластины разные индукционные металлоискатели. Такой способ определения чувствительности магниточувствительных металлоискателей неприемлем по тем причинам, что максимальная глубина обнаружения ферромагнитного предмета будет зависеть не только от размеров этого предмета, но и от его ориентации в пространстве и относительно чувствительного элемента, а также от степени намагниченности предмета. Принято при описании характеристик поисковых приборов для конкретизации чувствительности указывать глубину залегания предмета, формы, размеры и материал изготовления которого известен достаточному кругу людей.

Для магниточувствительных металлоискателей принято чувствительность обозначать величиной магнитной индукции поля, которую способен зарегистрировать прибор. Обычно чувствительность измеряют в нанотеслах (нТл).

Кроме чувствительности для определения качества прибора используют такой параметр, как разрешающая способность, который также измеряется в нанотеслах и определяет ту минимальную разницу индукции, которую возможно зарегистрировать прибором [1].

Для того чтобы представить величину индукции магнитного поля, которое регистрируют современные магнитометры, достаточно вычислить величину магнитного поля, создаваемого проводником с током в  $1\text{ мА}$  на расстоянии  $0.1\text{ м}$ .

Поле Земли составляет величину примерно  $35000\text{ нТл}$ . Это усредненная величина – в различных точках земного шара она меняется в диапазоне  $35000 - 60000\text{ нТл}$ . Таким образом задача поиска ферромагнитных предметов состоит в том, чтобы на фоне природного поля Земли обнаружить приращение поля, обусловленное искажениями от ферромагнитных предметов.

Существует несколько физических принципов и основанных на них типов магнитометрических приборов, позволяющих фиксировать минимальные изменения магнитного поля Земли или искажения, вносимые ферромагнитными объектами. Современные магнитометры обладают чувствительностью от  $0.01\text{ нТл}$  до  $1\text{ нТл}$ , в зависимости от принципа действия и класса решаемых задач [1].

Рассмотрим наиболее распространенные физические принципы построения магнитометров.

Первым методом, получившим наибольшее распространение, является метод, основанный на нелинейных свойствах ферромагнитных материалов. Чувствительные элементы, реализующие этот принцип, получили название феррозонды. Феррозонд представляет собой катушку индуктивности с нелинейным сердечником. Чаще всего в качестве такого сердечника используется пермаллоевая проволока. На рисунках 1 и 2 приведены чертеж и график, поясняющие принцип действия феррозонда.

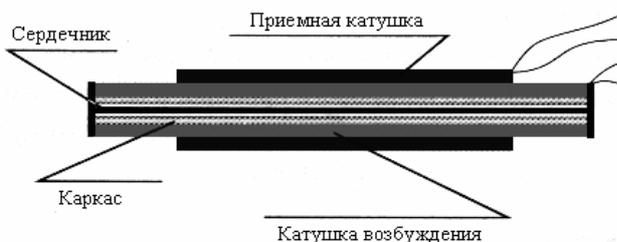


Рисунок 1

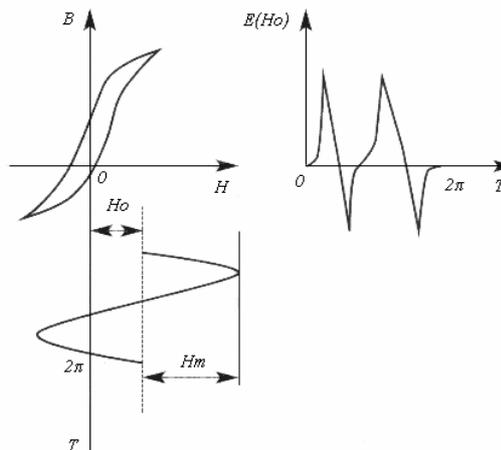


Рисунок 2

Если через катушку возбуждения пропустить переменный ток, который создаст переменное поле с амплитудой напряженности  $H_m$  и приложить к феррозонду соосное постоянное поле напряженностью  $H_o$ , то на выходе приемной катушки феррозонда появится напряжение, пропорциональное постоянному магнитному полю  $H_o$  и с удвоенной частотой. Появление напряжения удвоенной частоты обусловлено нелинейной характеристикой сердечника феррозонда. Это напряжение и является сигналом, по которому судят о внешнем магнитном поле.

Феррозонд является векторным прибором, т.е. выходной сигнал этого чувствительного элемента зависит не только от величины внешнего магнитного поля, но и от его направления относительно оси феррозонда [2].

Это свойство феррозонда позволяет использовать его в качестве ориентационного в пространстве устройства относительно силовых линий поля Земли, однако для построения поискового магнитометра это свойство является скорее недостатком, поскольку в процессе поиска изменение ориентации преобразователя поискового прибора неизбежно. Как было сказано выше, поиск ферромагнитных объектов происходит на фоне природного поля Земли, превосходящего на пять порядков приращения поля, вносимые объектами поиска, поэтому для решения задачи устранения влияния ориентации должны быть приняты нетривиальные конструктивные и электронносхемные приемы.

На рисунке 3 приведена схематическая конструкция преобразователя феррозондового поискового прибора, в котором влияние ориентации относительно силовых линий поля Земли в значительной степени компенсировано.

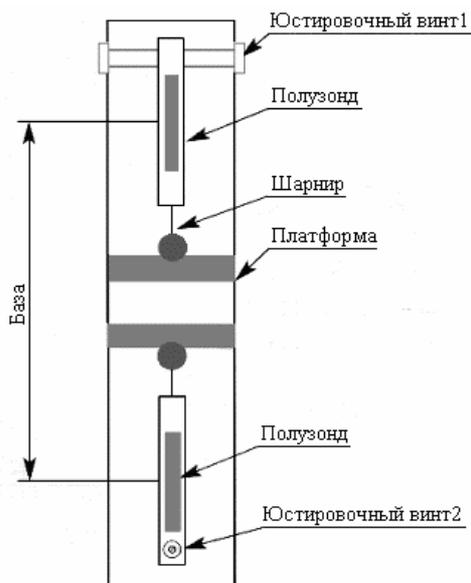


Рисунок 3

Преобразователь представляет собой два включенных дифференциально и расположенных на одной оси и на определенном расстоянии (базе) друг от друга феррозонда. Каждый феррозонд в таком преобразователе называют полузондом.

Юстировочные винты 1 и 2 обеспечивают взаимно перпендикулярное смещение полузондов относительно точек шарнирного крепления и позволяют тем самым добиваться высокой степени соосности полузондов. На рисунке 4 приведена электрическая схема дифференциального феррозондового преобразователя.

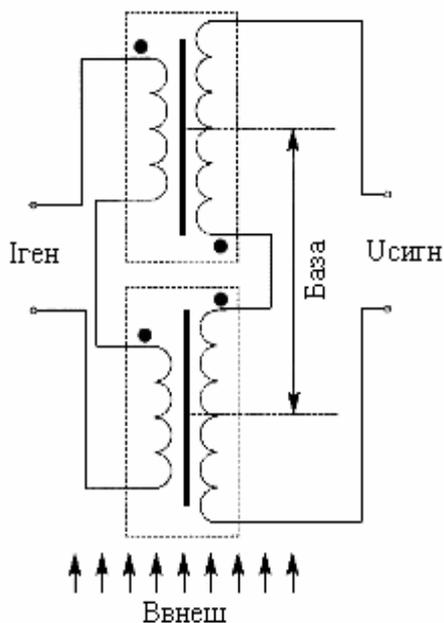


Рисунок 4

$I_{ген}$  — ток возбуждения феррозонда;  
 $U_{сигн}$  — напряжение на выходе измерительных обмоток.

$U_{сигн}$  представляет собой сложногогармонический сигнал, в котором информацию о величине внешнего магнитного поля несет разница амплитуд второй гармоники с каждого полузонда.

Поскольку полузонды выполнены идентичными, то выходной сигнал не зависит от равномерного поля Земли, а определяется лишь градиентом внешнего поля. Феррозондовый преобразователь, выполненный по дифференциальной схеме (см. рисунки 3, 4), называют градиентометрическим или градиентометром.

Процедура юстировки преобразователя позволяет в достаточной для практики степени исключить влияние на выходной сигнал пространственной ориентации преобразователя относительно силовых линий магнитного поля Земли. Кроме этого преобразователь располагают конструктивно на вращающейся оси с тем, чтобы под собственным весом он всегда занимал вертикальное положение относительно земной поверхности, что целесообразно по двум причинам: во-первых, силовые магнитные линии природного поля направлены под углом  $40^{\circ}$  к поверхности Земли и градиент поля от вносимых ферромагнитными предметами искажений будет максимален при сближении направления природного поля с осью преобразователя, во-вторых, такое естественное расположение преобразователя снижает погрешности от пространственных колебаний преобразователя, неизбежные при поиске [3].

Конструкция феррозондового металлодетектора включает в себя штангу, с размещенными на ней батарейным блоком питания и электронным блоком, и феррозондовый преобразователь, вращающийся на оси, перпендикулярной штанге и преобразователю.

На рисунке 5 показано, как происходит искажение силовых линий магнитного поля Земли ферромагнитным предметом, что и фиксирует феррозондовый прибор.

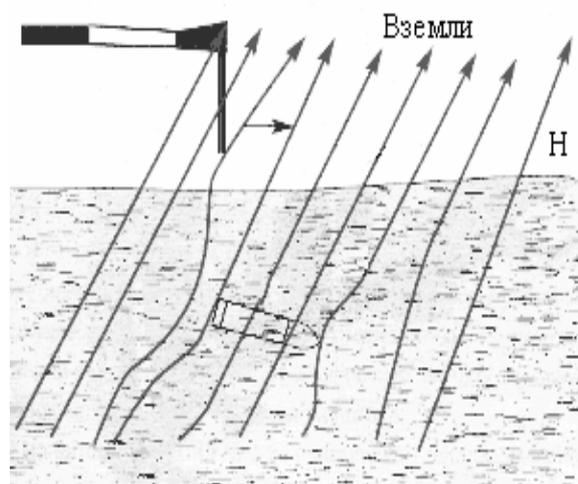


Рисунок 5

Как говорилось выше, феррозондовый преобразователь является векторным прибором, т.е. выходной сигнал преобразователя зависит от величины и направления приложенного поля. Это позволяет получать дополнительную информацию об ориентации и размерах скрытого ферромагнитного объекта. На рисунке 6 показана огибающая выходного сигнала преобразователя от протяженного предмета (труба) под землей.

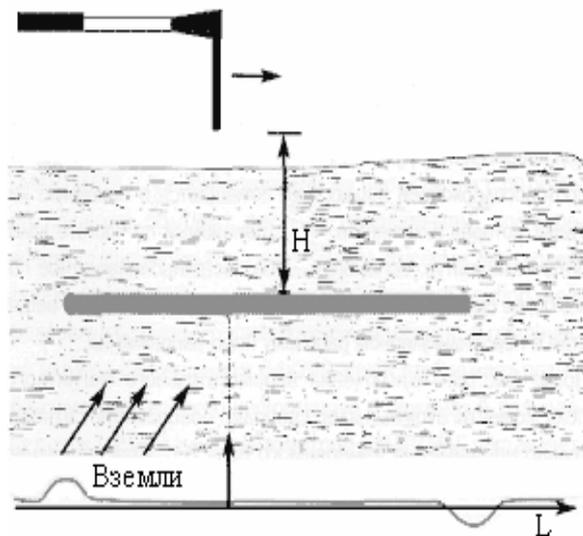


Рисунок 6

С помощью феррозондового градиентометра возможно оценивать глубину залегания предметов, для чего необходимо прорисовать огибающую сигнала от предмета в координатах:  $U$  – уровень сигнала,  $L$  – расстояние. Ширина этой огибающей на уровне 0.5 от максимума приблизительно равна глубине залегания предмета. На рисунке 7 показана огибающая сигнала с преобразователем при его перемещении над скрытым под землей объектом на расстоянии  $H$ .

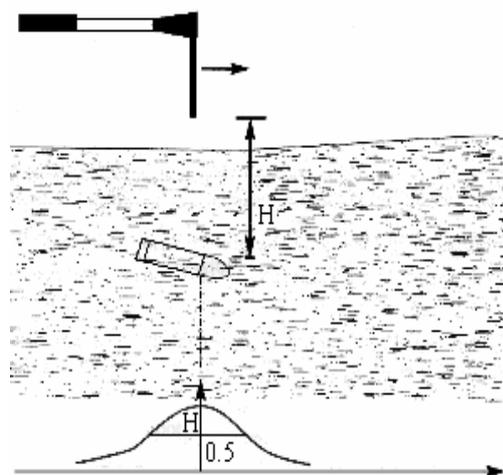


Рисунок 7

**Выводы.** Будучи достаточно простым устройством, феррозонд позволяет проводить прецизионные измерения векторных величин магнитного поля, а также малых угловых перемещений каких-либо тел, находящихся в геомагнитном или искусственно созданном магнитном поле.

Таким образом, прибор, построенный на основе феррозондового преобразователя, может быть использован для различных применений:

- Поиск и локализация всех ферромагнитных предметов.
- Поиск и локализация больших объектов с подавлением влияния малых предметов.
- Поиск движущихся объектов – влияние статических объектов подавлено.
- Использование феррозонда в качестве компаса.

#### Библиографический список

1. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. - Л.: Энергия, 1969. - 345с.
2. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Щелкин А.П. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. - Л.: Энергия, 1972. - 400с.
3. Арбузов С.О. Магниточувствительные поисковые приборы// Специальная техника. 2000. №6. С. 12 - 19.