

УДК 681.584.311

**МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ПОДЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

С.К. Прищепов, К.И. Власкин

Уфимский государственный авиационный технический университет

E-mail: ugatu\_iit@mail.ru

*Определены условия задачи поиска скрытых ферромагнитных предметов на фоне действия нормального магнитного поля Земли. Рассмотрены функциональные возможности магнитометров, предназначенных для обнаружения магнитных аномалий. Представлен комплексный гравитационный магнитометрический прибор для определения местоположения локальных магнитных объектов, скрытых в неферромагнитных укрывающих средах.*

**Ключевые слова:**

*Однородное магнитное поле, магнитная аномалия, диаграмма направленности феррозонда, жидкостной маятниковый коммутатор.*

**Key words:**

*Homogeneous magnetic field, magnetic anomaly, fluxgate pattern, liquid level switch.*

При поиске подземных стальных нефте- и газопроводов, очистных, калибровочных и диагностических внутритрубных снарядов, затонувшей техники, а также скрытых строительных сооружений возникает задача обнаружения локальных магнитных неоднородностей в неферромагнитных укрывающих средах (земле, воде, снеге). Известны следующие методы обнаружения металлических объектов в укрывающих средах:

- индукционный;
- магнитометрический;
- радиолокационный;
- сейсмоакустический.

Практическое применение находят, в основном, первые два метода из перечисленных [1], т. к. реализуются при помощи наиболее функционально принадлежащих чувствительных элементов (ЧЭ). Основное отличие магниточувствительных приборов от индукционных заключается в том, что они могут находить только ферромагнитные предметы. По отношению к искомому объекту магниточувствительные приборы являются пассивными — как правило, не оказывающими на него магнитного воздействия.

На земной поверхности магнитометрический метод заключается в выявлении на фоне нормального магнитного поля Земли (НМПЗ) его аномалии. Вектор НМПЗ представляет собой историческую и геофизическую константу по направлению действия и уровню:  $|T|_{\text{нмпз}} \approx 5 \cdot 10^4$  нТл. По сравнению с НМПЗ магнитные аномалии (МА), источниками которых являются искомые ферромагнитные предметы, незначительны — 5...500 нТл. Следовательно, в общем случае задача поиска подземных ферромагнитных объектов состоит в определении малых приращений больших величин.

Существует несколько физических принципов и основанных на них типов магнитометрических приборов, позволяющих фиксировать минимальные изменения НМПЗ [1]:

- квантовые и сверхпроводящие магнитометры;
- магнито-оптические преобразователи;
- датчики Холла;
- феррозондовые магнитометры.

На фоне высокой чувствительности приборов первых двух классов основным их недостатком является

отсутствие осевой направленности ЧЭ и, следовательно, невозможность определения пространственной ориентации вектора магнитного поля, создаваемого объектом измерения (ОИ). Это может внести неясность в результат измерения, особенно если требуется точное определение местоположения ферромагнитного объекта, как, например, при поиске остановившегося в магистральном трубопроводе внутритрубного снаряда. Кроме того общим недостатком квантовых, сверхпроводящих и оптико-механических магнитометров является их громоздкость, а также низкое быстродействие, что в совокупности может привести к пропуску объекта поиска при быстром сканировании.

В полевых условиях наиболее широкое применение нашли феррозондовые приборы, характеризующиеся не только высокой чувствительностью и стабильностью метрологических характеристик, но и осевой направленностью, что дает возможность непосредственного измерения составяющих вектора магнитного поля, обеспечивая тем самым получение полной информации о его структуре и источниках. Феррозондовые магнитометры (ФМ) пригодны для работы со слабыми магнитными полями в широком температурном диапазоне и отличаются высокой надежностью, малым энергопотреблением и низкой стоимостью. Собственные шумы новейших феррозондовых приборов находятся на уровне порядка  $10^{-12}$  Тл, т. е. на два порядка ниже, чем, например, у датчиков Холла [1].

Диаграмма направленности феррозонда позволяет использовать его в качестве ориентируемого в пространстве устройства относительно силовых линий поля Земли. Однако для построения поискового магнитометра это свойство является скорее недостатком, т. к. НМПЗ на несколько порядков превосходит поля, создаваемые ОИ, а в процессе поиска изменение ориентации ЧЭ преобразователя неизбежно. Поэтому для решения задачи устранения влияния ориентации магнитометра должны быть применены нетривиальные методологические, конструктивные и схемные приемы.

Одним из таких приемов является применение трехкомпонентных феррозондовых преобразователей [2]. Они позволяют определять модуль суммар-

ного вектора магнитного поля при любой пространственной ориентации магнитометрического датчика. Однако при этом усложняется конструкция магнитометра, что связано с трудностью прецизионного расположения элементов датчика во взаимортогональных плоскостях. Сложность изготовления такого магнитометра неизбежно ведет к его удорожанию. Кроме того чувствительность таких магнитометров не может быть высокой, т. к. феррозонды измеряют магнитные величины, близкие к  $|T_{\text{НМПЗ}}$ , т. е. высокого уровня. Поэтому при поиске подземных ферромагнитных объектов нашел применение метод с однокомпонентным, вертикально ориентированным феррозондом, скомпенсированным по НМПЗ, т. е. измеряющим в режиме воздействия на его ось чувствительности (ОЧ) единственную магнитную величину – вектора МА.

Реализация метода представляется перспективной в устройстве, содержащем объект измерения в виде МА-источника постоянного магнитного поля, генератор, подключенный к обмотке возбуждения дифференциального феррозонда, имеющего сигнальную обмотку, а также дополнительную обмотку компенсации. Феррозондовый датчик удерживается оператором над подземной МА в вертикальном положении. Воздействия фоновых по отношению к объекту измерения магнитных полей, в том числе НМПЗ, компенсируются в магнитных сердечниках дифференциального феррозонда током в обмотке компенсации, уровень которого схемными методами устанавливается пропорциональным каждому из фоновых воздействий [3]. Данное устройство фактически представляет собой систему управления по возмущающим воздействиям случайных уровней, является сложным в изготовлении, настройке и эксплуатации. Кроме того, регулирование компенсирующего поля постоянным током в обмотке ФМ определяет малую стабильность и быстродействие устройства.

Существует метод обнаружения подземных магнитных объектов, в основу которого положен тот факт, что вертикальная составляющая вектора НМПЗ является постоянной  $|Z| = \text{const}$  в радиусе 10 км на поверхности Земли. При реализации метода для автоматической установки оси чувствительности ФМ в пространстве вертикально, широко применяются различные гравитационные ориентаторы [4]. Поскольку поиск объекта производится оператором, находящимся в движении, неизбежно появление погрешностей ориентации вследствие импульсных и высокочастотных механических помех. Для их демпфирования применяется карданов подвес, который вместе с датчиком помещен в непроводящую электрический ток жидкость, рис. 1. Для достижения более высоких точности и стабильности ориентации феррозонда магнитометр оснащен жидкостным коммутатором, разрешающим выборку значения измеряемого магнитного поля только при совпадении магниточувствительной оси феррозонда с вертикалью.

Жидкостный маятниковый коммутатор (ЖМК) представляет собой капсулу особой формы, заполненную токопроводящей жидкостью так, что име-

ется пузырёк воздуха, размыкающий контакты капсулы в момент вертикального положения феррозонда. Угловая чувствительность ЖМК не хуже  $0...1,5^\circ$ . Функциональная схема устройства приведена на рис. 2.

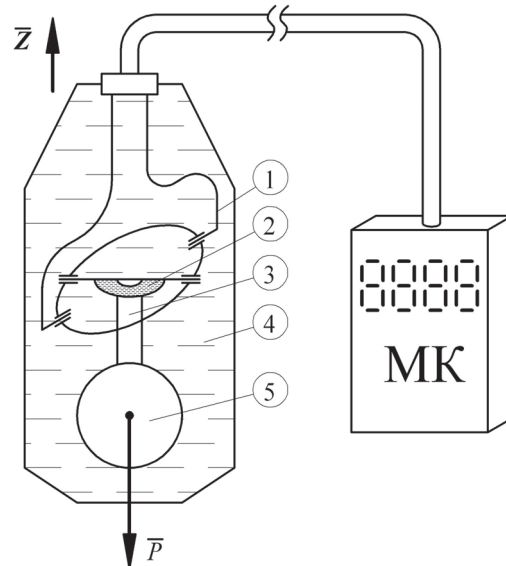


Рис. 1. Обобщенная схема устройства: 1) подвес гравитационного ориентатора; 2) жидкостный маятниковый коммутатор; 3) феррозондовый датчик; 4) демпфирующая жидкость; 5) груз маятника; МК – микроконтроллер с электронным преобразователем сигналов ФМ;  $\vec{P}$  – вектор силы тяжести;  $\vec{Z}$  – вертикальная составляющая НМПЗ

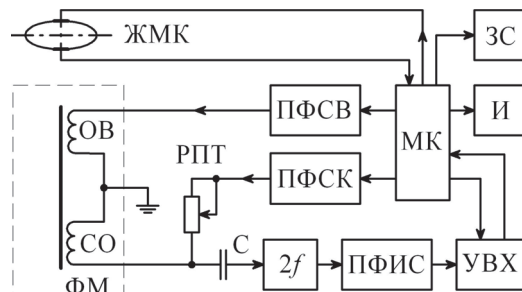


Рис. 2. Функциональная схема однокомпонентного феррозондового магнитометра: ФМ – феррозондовый магнитометр; ОВ – обмотка возбуждения феррозонда; СО – сигнальная обмотка феррозонда; ЖМК – жидкостный маятниковый коммутатор; С – разделительный конденсатор; ПФСВ – преобразователь формы сигнала возбуждения частоты  $f$ ;  $2f$  – полосовой фильтр; ПФИС – преобразователь формы измерительного сигнала; УВХ – устройство выборки-хранения; МК – микроконтроллер; ПФСК – преобразователь формы сигнала компенсации; РПТ – регулятор постоянного тока; И – индикатор цифровой; ЗС – звуковой сигнализатор вертикали

Работа устройства заключается в следующем. Феррозондовый датчик устанавливается по ЗС – звуковому сигналу в вертикальное положение вблизи поверхности Земли на участке с наименьшей концентрацией магнитных аномалий, которая определяется по показанию индикатора И, отображающему известную для данных географических координат

величину  $Z=\text{const}$ . Измерительная часть ФМ с высокой точностью воспроизводит  $Z$ -составляющую НМПЗ лишь в строго вертикальном положении ОЧ. При отклонении ОЧ от вертикали ФМ воспринимает еще и горизонтальную составляющую НМПЗ, что является ложным сигналом наличия МА.

По ЗС в условиях НМПЗ оператор производит регулирование РПТ до наименьшего значения показаний индикатора И, которое означает компенсацию магнитным полем СО фонового  $Z=\text{const}$  магнитного воздействия на ОЧ ФМ. Измерение возможно лишь в строго вертикальном положении модуля ФМ – ЖМК, когда один из контактов жидкостного коммутатора изолирован, что приводит к срабатыванию компаратора в структуре МК, инициирующего УВХ и начало цикла АЦП-преобразования и индикации, длительность которого составляет 3...10 с. Если очередной результат измерения на индикаторе И превышает предыдущий, то оператор перемещается по земной поверхности в направлении залегания магнитной аномалии. Если числовое значение на индикаторе уменьшилось, оператору следует вернуться на предыдущую позицию и скорректировать направление движения по показаниям индикатора. Точное местоположение скрытой подземной МА соответствует максимальному отклонению численного значения на индикаторе И от первоначально установленного.

Удаленность оператора более чем на 10 км от первоначального места измерений при перемещении по географическому меридиану приводит к изменению  $Z$ -составляющей НМПЗ на величину, измеримую с уровнем чувствительности ФМ. Поэтому РПТ является прецизионным элементом магнитометра, определяющим начальные условия поиска подземной МА – устанавливающим ток компенсации ФМ в соответствии с известным  $Z=\text{const}$ , что дает нулевое внешнее магнитное воздействие на ФМ и обеспечивает его высшую (пороговую) чувствительность к МА – порядка 0,2 нТл.

ЖМК является прецизионным исполнительным элементом магнитометра, исключаяющим в условиях НМПЗ воздействие горизонтальной его составляющей на ОЧ ФМ, что обеспечивает в момент измерения строгое равенство поля компенсации ФМ значению  $Z=\text{const}$ , т. е. обнаружение МА на уровне порога чувствительности ФМ.

Магнитометр выполнен в виде переносного прибора с автономным встроенным источником питания. Феррозондовый датчик и капсула ЖМК размещены в немагнитном цилиндрическом корпусе и соединены с прибором при помощи кабеля согласно схеме рис. 2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В. Средства измерения параметров магнитного поля. – Л.: Энергия, 1976. – 320 с.
2. Способ измерения полного вектора магнитного поля, а также устройство для его осуществления: пат. 2218577 Рос. Федерация. № 2001130411/09; заявл. 09.11.01; опубл. 10.12.03, Бюл. № 34. – 587 с.

Технические характеристики прибора:

1. Габариты капсулы датчика, мм:  $\varnothing 34 \times 72$ .
2. Масса датчика, г: 175.
3. Габариты корпуса прибора, мм:  $16,5 \times 12,8 \times 5,2$ .
4. Масса прибора, г: 350.
5. Длина соединительного кабеля, м: 1,5.
6. Напряжение питания, В:  $6 \pm 3 \%$ .
7. Ток потребления датчика, мА: 27.
8. Суммарный ток потребления прибора, мА: 110.

Таким образом, сочетание в разработанном комплексном приборе: компенсационной схемы ФМ, прецизионного исполнительного элемента ЖМК и метода, основанного на свойстве НМПЗ  $Z=\text{const}$  в области заданного радиуса, обеспечивает совокупность позитивных, по сравнению с аналогами, функциональных признаков:

- измерение производится в момент 100-процентной компенсации ФМ, т. е. в режиме его наибольшей чувствительности к МА;
- уровень поля компенсации ФМ, эквивалентный  $Z=\text{const}$ , остается в цикле измерений неизменным, что повышает стабильность, быстродействие, технологичность измерительного процесса;
- совмещение по вертикали осей чувствительности прецизионных ФМ и ЖМК с погрешностью не хуже 12 угл. мин. обеспечивает минимизацию радиуса залегания обнаруженной подземной МА.

Создан макетный образец комплексного прибора, проведены стендовые испытания по обнаружению МА, подтверждающие устойчивость результатов измерений в условиях механических помех, а также высокую чувствительность компенсационной схемы феррозондового магнитометра.

#### Выводы

1. Разработан феррозондовый магнитометрический прибор, обладающий свойством идентификации параметров, поскольку среди металлодержащих предметов чувствителен только к ферромагнетикам.
2. Диаграмма направленности феррозондового магнитометра в сочетании с жидкостным прецизионным индикатором вертикали обеспечивает повышенную точность определения местоположения скрытого подземного объекта.
3. Совмещение в моменты измерений оси чувствительности магнитометрического датчика с вертикалью обеспечивает его компенсацию полем неизменного уровня, что в цикле поисковых операций повышает стабильность, быстродействие, технологичность измерительного процесса.
3. Устройство для обнаружения очистного поршня в трубопроводе: пат. 2123897 Рос. Федерация. № 5062216/12; заявл. 14.09.92; опубл. 27.12.98, Бюл. № 36. – 307 с.
4. Устройство ориентирования датчиков в геофизических приборах: авт. свид. 1346772 СССР. № 3986259/22-03; заявл. 09.12.85; опубл. 23.10.87, Бюл. № 39. – 146 с.

Поступила 30.06.2011 г.