

ИЗМЕРЕНИЕ ЗЕМНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТОМЕТРОМ С ДАТЧИКОМ ИЗ АМОРФНОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

В.И. Барышев

Описывается магнитоимпедансный магнитометр для измерения магнитного поля Земли в широком диапазоне частот (0–10000 Гц), превосходящий по некоторым характеристикам многие зарубежные аналоги. В качестве датчика напряженности магнитного поля используется датчик, выполненный на аморфном ферромагнитном материале.

Введение

На рубеже 20–21 веков японским ученым Канео Мори был открыт новый физический эффект – зависимость импеданса проводников из нанокристаллических и аморфных ферромагнитных сплавов от магнитного поля в окружающей среде. Новый эффект немедленно нашел практическое применение в магнитометрии [Mohri, 1994].

Датчики магнитного поля из аморфных сплавов превосходят магниторезисторы, магнитодиоды, датчики Холла в десятки и сотни раз по чувствительности, обладают высокой стабильностью и, что весьма существенно, способны работать в широком диапазоне частот – от нулевой частоты до десятков мегагерц.

Принцип действия магнитоимпедансного датчика [Kanno, Mohri, Vagi, 1997] базируется на следующем.

Импеданс Z цилиндрического проводника из аморфного сплава с радиусом a и длиной l , возбуждаемого переменным током с частотой ω , выражается функцией Бесселя

$$|Z| = \left(\frac{a}{2} \rho^{1/2} \right) R_{dc} (\omega \mu H_{ex})^{1/2}$$

Величина Z меняется с изменением магнитного поля H_{ex} приложенного параллельно оси проводника, за счет сильного скин-эффекта ($\delta \ll a$). Весьма высокая чувствительность достигается в датчиках на проволоке диаметром около 30 мКм из аморфного материала с нулевой магнитострикцией. Изменение $\frac{\Delta \mu}{\Delta H_{ex}}$ может составить 100% на Эрстед и более.

Конструкция датчика

Конструкция магнитоимпедансного датчика чрезвычайно проста. Через проводник, изготовленный из аморфного сплава, пропускается ток относительно высокой частоты от генератора накачки. При изменении окружающего магнитного поля, подлежащего измерению, меняется импеданс проводника и, следовательно, ток через него, что вызывает изменение переменного магнитного потока и изменение переменного напряжения на зажимах обмотки, окружающей проводник, которое далее выпрямляется и служит, в конечном счете, мерой измеряемого поля.

Конкуренцию по чувствительности и быстродействию магнитоимпедансным магнитометрам могли бы составить индукционные магнитометры. Однако основным недостатком последних – большие трудности при желании получить широкую полосу рабочих частот и полная невозможность регистрации постоянного и квазипостоянного магнитного поля. Так, например, выпускаемые ныне (2007–2008 гг.) немецкой фирмой «Метроникус» индукционные магнитометры MFS-6 и MFS-7 не являются чисто индукционными, так как для охвата области низких частот применяют дополнительный встроенный модулятор с ручным переключением, что вряд ли удобно в эксплуатации.

Итак, в отличие от многих других типов магнитометров, магнито-импедансный магнитометр в принципе:

- а) способен регистрировать магнитное поле от 0 Гц до десятков мГц и выше;
- б) имеет высокую чувствительность;
- в) регистрирует величину магнитной индукции B , а не величину производной dB/dt , то есть не требует интегратора и с высокой точностью воспроизводит поле любой формы (синусоидальное, прямоугольное, треугольное, пилообразное и т.п.);
- г) имеет принципиально низкий шумовой порог, так как не имеет высокоомных цепей на входе;
- д) имеет высокий коэффициент преобразования поля в электрический сигнал до усиления, что реально снижает требования к шумовым свойствам предусилителя.

На рис. 1 а, б, в приведены характеристики линейности, частотные и температурные характеристики для зарубежного магнитоимпедансного датчика MI-CB-1DB, выпускаемого корпорацией Aichi Micro Intelligent Corporation. Датчик выполнен на плоской пластине размером 31×11 мм.

В Институте динамики геосфер РАН (ИДГ РАН) разработан магнитоимпедансный магнитометр с аморфным датчиком. На рис. 2 представлена блок-схема измерителя одной компоненты магнитного поля Земли с использованием аморфного датчика.

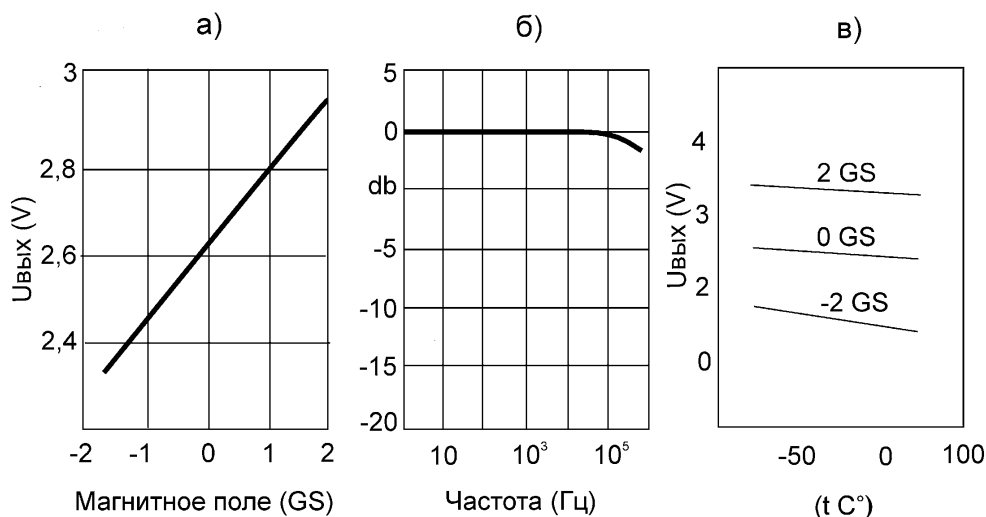


Рис. 1. Датчик MI-CB-1DB

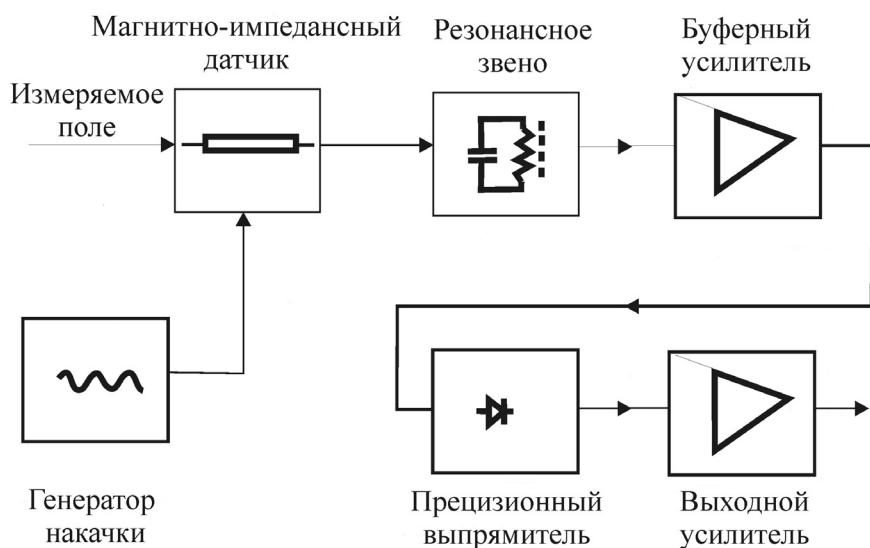


Рис. 2. Блок-схема магнитометра

Магнитоимпедансный датчик представляет собой проводник из аморфного материала 82К3ХСР диаметром 30 мкм с покрытием из стекла толщиной 1,5 мкм с магнитоимпедансными свойствами, разработанный в НИИ прецизионных сплавов и любезно предоставленный в наше распоряжение руководителем разработки А.Ф. Прокошиным. Применение стеклянной оболочки является технологическим приемом, уменьшающим число поверхностных дефектов и, таким образом, снижающим уровень собственных шумов материала. Конструктивно датчик представляет собой диэлектрик-основание, конкретно стеклопластик шириной 2 и длиной 160 мм, на который приклеен цианакрилатным клеем проводник из сплава 82К3ХСР, поверх которого намотана обмотка из 300 витков медного провода диаметром 0,3 мм. На рис. 3 изображена принципиальная схема магнитометра.

Генератор накачки на частоту 100 кГц собран по LC схеме на полевом транзисторе КП307Г и через усилитель мощности BUF634 питает током чувствительный элемент датчика. Напряжение с обмотки датчика выделяется на резонансном контуре LC, настроенном на частоту второй гармоники, то есть на 200 кГц. Напряжение с контура LC пропорционально изменению импеданса dZ/Z датчика и добротности контура Q . Применение резонансного звена дает существенный выигрыш в чувствительности – порядка 20 раз. Практически, коэффициент передачи измерительной системы от поля до входа усилителя составляет около 20V/GS во всем рабочем диапазоне частот. При частоте 200 кГц и добротности 20 рабочая полоса магнитометра составит $200 \text{ кГц}/20 = 10 \text{ кГц}$. Заметим, что полоса феррозондового магнитометра LEMI-018 не превышает 1 Гц. Кстати, в предлагаемом магнитометре заложена возможность расширения рабочей полосы, скажем, в 10 раз. Для этого следует повысить частоту накачки со 100 кГц до 1 МГц.

Выделенный на резонансном звене сигнал далее детектируется на прецизионном выпрямителе и сглаживается фильтром.

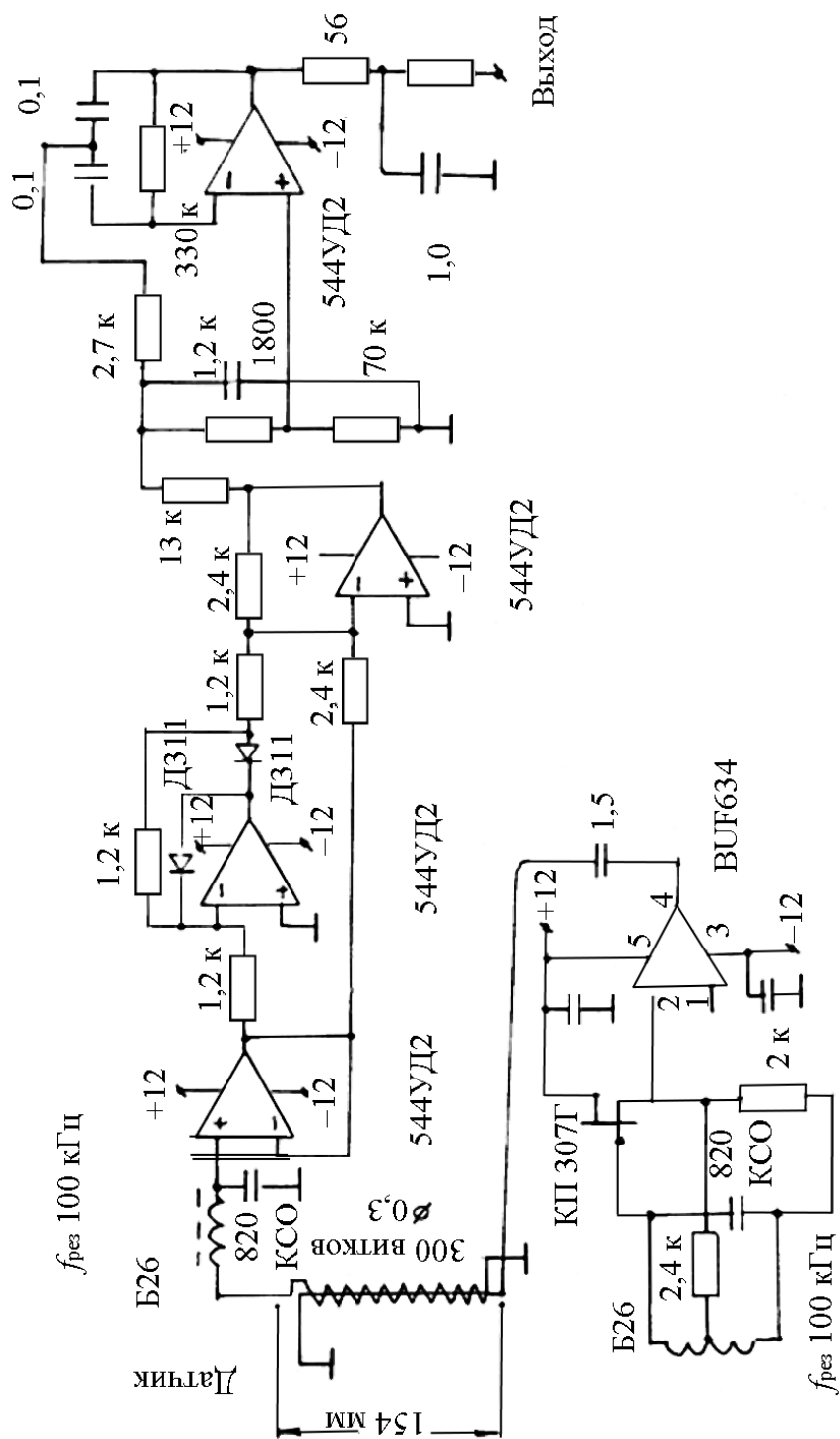


Рис. 3. Принципиальная схема магнитометра

Результаты испытаний магнитометра

В ИДГ РАН разработан и изготовлен опытный образец магнитоимпедансного магнитометра с аморфным датчиком, показанный на рис. 4. Три таких однокомпонентных модуля позволят реализовать трехкомпонентный геомагнитометр с теми же качествами.

Магнитометр был испытан в постоянных и переменных магнитных полях синусоидальной, прямоугольной, треугольной и пилообразной формы. Установленный в помещении серверной на третьем этаже здания ИДГ РАН магнитометр фиксировал вертикальную составляющую магнитного поля в течение суток от 0 до 24 часов 10 февраля 2010 года. Фрагменты записи, для наглядности растянутые по оси времени, приводятся на рис. 5 (фрагмент длительностью около 3000 сек) и на рис. 6 (фрагмент длительностью 300 сек).

Острая диаграмма направленности датчика позволяет наблюдать четкую работу магнитометра даже в условиях значительных помех в помещении лаборатории. Значительный уровень помех с частотой 50, 100, 150 Гц, а также существенные помехи от персональных компьютеров, не позволяют, к сожалению, определить прямым измерением разрешающую способность магнитометра. Однако косвенные оценки по собственным шумам магнитного материала и коэффициента преобразования датчика позволяют предположить, что порог чувствительности магнитометра находится на уровне 0,001–0,01 нТ.



Рис. 4. Макет магнитометра

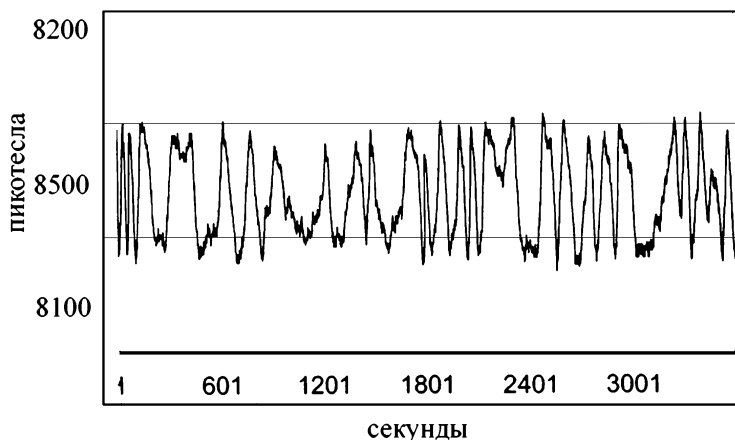


Рис. 5

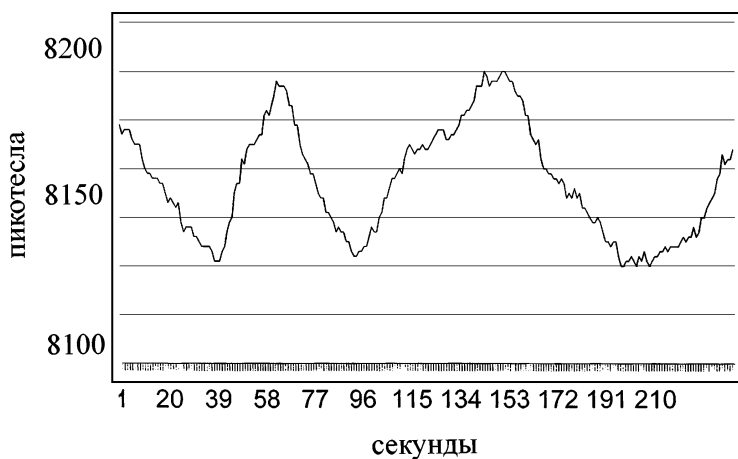


Рис. 6

Диапазон рабочих частот магнитометра 0–10 кГц
 Диапазон регистрируемых полей +70000 -70000 нТ

Может быть проведена некоторая аналогия между магнитоимпедансным датчиком и датчиком феррозондового магнитометра. В последнем меняется импеданс обмотки на ферромагнитном сердечнике из материала, обладающего резко выраженной нелинейностью петли гистерезиса. Типичное значение рабочей полосы частот феррозондового магнитометра составляет единицы, от силы десятки Гц (таков, например, вполне современный LEMI-018, выпускаемый в г. Львове (Украина), феррозондовые приборы ИЗМИРАНа и т.п.).

Выводы

Разработан магнитоимпедансный магнитометр для измерения магнитного поля в широком диапазоне частот (0–10 000 Гц), включающий датчик, выполненный на аморфном ферромагнитном материале. Показана возможность достижения добротности $Q = 10$ на частоте 1 мГц, что даст возможность регистрировать сигнал частотой от 0 до 100 кГц.

Литература

- K. Mohri, Mater. Sci.A* 185(1994) 141.
T. Kanno, K. Mohri, T. Vagi, T. Uchiyama, L.P. Shen IEEE Trans. Magn. 22 (5) (1997) 3358
Magn. 31 (6)(1995) 3137.
T. Kitoh, K. Mohri, T. Uchiyama, IEEE Trans.
L.V. Panina, K. Mohri, J. Magn. Mater. 157/158(1996)137.