

О ПОРОГЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ*Сокол-Кутыловский О.Л.* – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Экспериментально измерена величина порога чувствительности магнитомодуляционных датчиков слабого магнитного поля с аморфным ферромагнитным сердечником в условиях частичного экранирования внешнего геомагнитного поля. Показано, что в области низких частот теоретический порог чувствительности магнитомодуляционных датчиков может быть ниже $0,6 \cdot 10^{-12}$ Тл·Гц^{-1/2}.

Магнитомодуляционный датчик, магнитный шум, аморфный ферромагнитный сердечник.

ABOUT RESOLVING POWER OF MAGNETO-MODULATION SENSORS*Sokol-Kutylovskiy O.L.* – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Resolving power of magneto-modulation magnetic field sensors with amorphous ferromagnetic core in condition of partial screening is considered. It is shown, the threshold of sensitivity of magneto-modulation magnetic field sensor may be lower than received value $0.6 \cdot 10^{-12}$ T·Hz^{-1/2}.

Magneto-modulation sensor, magnetic noise, amorphous ferromagnetic core.

Введение

Магнитомодуляционные датчики с сердечниками из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией, работающие в режиме автопараметрического усиления, целесообразно использовать для регистрации и измерения слабого магнитного поля низких частот, где они имеют некоторые преимущества перед другими типами преобразователей слабого магнитного поля.

Многочисленные записи магнитного поля в условиях спокойной геомагнитной обстановки как в дневное, так и в ночное время показали, что в диапазоне частот менее 1 Гц уровень геомагнитного шума, меньший $\sim 2,5 \cdot 10^{-12}$ Тл·Гц^{-1/2}, практически

не наблюдается. По-видимому, это значение близко к минимальному уровню шума магнитосферы в этом диапазоне, и дойти до аппаратного шума магнитомодуляционных датчиков в естественных условиях не представляется возможным.

Пример записи трех составляющих магнитной индукции в спокойном геомагнитном поле вдали от источников техногенных электромагнитных шумов (юго-запад Артинского района), полученных в полосе пропускания 25 Гц, показан на рис. 1.

Уровень магнитного шума магнитомодуляционных датчиков в области частот выше 10 Гц, измеренный в электромагнитном экране, ранее оценивался величиной $\sim 10^{-12}$ Тл·Гц^{-1/2} (Сокол-Кутыловский, 2009).

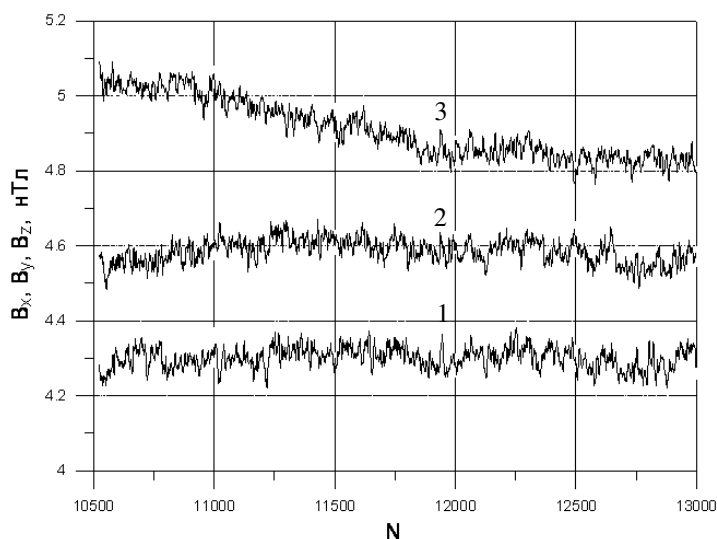


Рис. 1. Запись амплитуды вариаций трех составляющих геомагнитного поля V_x (1), V_y (2) и V_z (3); N – число отсчетов АЦП, продолжительность показанного фрагмента записи – около 20 с

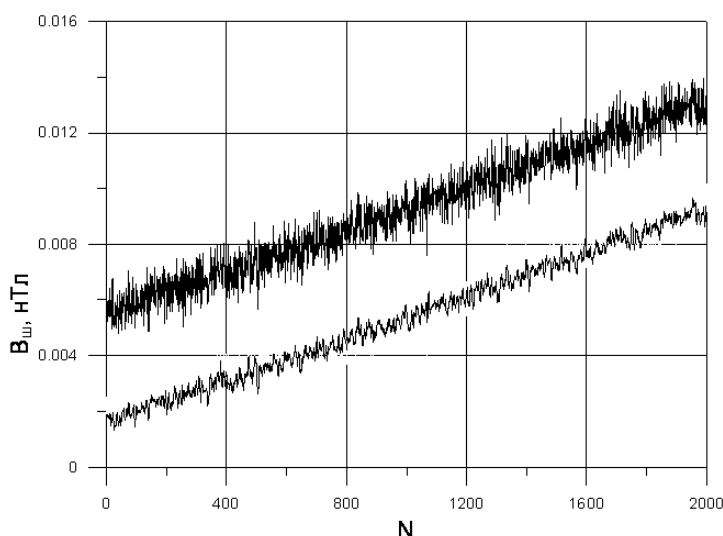


Рис. 2. Эквивалентный шум электроники магнитомодуляционного преобразователя и АЦП при различной ширине полосы пропускания (пояснения в тексте); N – число отсчетов, продолжительность записи – 15 с

Для более низких частот из-за недостаточного экранирования внешнего магнитного шума достоверных данных получено не было.

Параметры аппаратуры и результаты измерений

В новом комплекте аппаратуры для снижения уровня собственных шумов электронной схемы в электронных регуляторах и в генераторе возбуждения были применены прецизионные операционные усилители OP177F и источник опорного напряжения AD780BN. Коэффициент преобразования трехкомпонентного автопараметрического магнитомодуляционного преобразователя в полосе частот 0,01–35 Гц был установлен равным 71 мВ/нТл. Такой высокий коэффициент преобразования позволил получить эквивалентный уровень шума, создаваемого электронной схемой совместно с 24-х разрядным АЦП AD7734, около $2 \cdot 10^{-12}$ Тл от пика до пика во всей полосе пропускания (рис. 2, верхняя кривая) или около $1 \cdot 10^{-12}$ Тл от пика до пика в полосе пропускания 25 Гц (рис. 2, нижняя кривая). В пересчете к среднеквадратичному значению это соответствует величине эквивалентного магнитного шума электронной схемы $\sim 0,04 \cdot 10^{-12}$ Тл·Гц^{-1/2}. Кроме того, для исключения импульсных помех со стороны источников электропитания, в аппаратуре не использовались импульсные преобразователи напряжения, а все положительные и отрицательные питающие напряжения подавались от отдельных ис-

точников постоянного тока. Аналоговая и цифровая части АЦП также были запитаны от отдельных источников тока.

Модернизированный вариант трехкомпонентного магнитомодуляционного преобразователя был опробован в условиях частичного экранирования геомагнитного поля на большом удалении от источников техногенных электромагнитных помех. При измерениях были использованы зоны экранирования геомагнитного поля, возникающие на небольшом расстоянии от нескольких вертикально расположенных стальных труб (скважин газового месторождения).

На рис. 3 приведен фрагмент синхронной записи двух горизонтальных составляющих магнитной индукции в области экранирования на значительном удалении от населенных пунктов при относительно спокойном геомагнитном поле. За счет эффекта экранирования вариации геомагнитного поля подавлены здесь более чем в 10 раз.

Амплитуда шума геомагнитного поля на некоторых фрагментах записи (продолжительностью до 1 с) находилась в пределах $\sim 5 \cdot 10^{-12}$ Тл от пика до пика в полосе пропускания измерительного тракта 25 Гц, что соответствует среднеквадратичному значению $\sim 0,2 \cdot 10^{-12}$ Тл·Гц^{-1/2}. Между многими пиковыми значениями амплитуды взаимно-ортогональных горизонтальных составляющих хорошо видны совпадения во времени, из чего следует, что они вызваны внешним магнитным полем и не относятся к собственному магнитному шу-

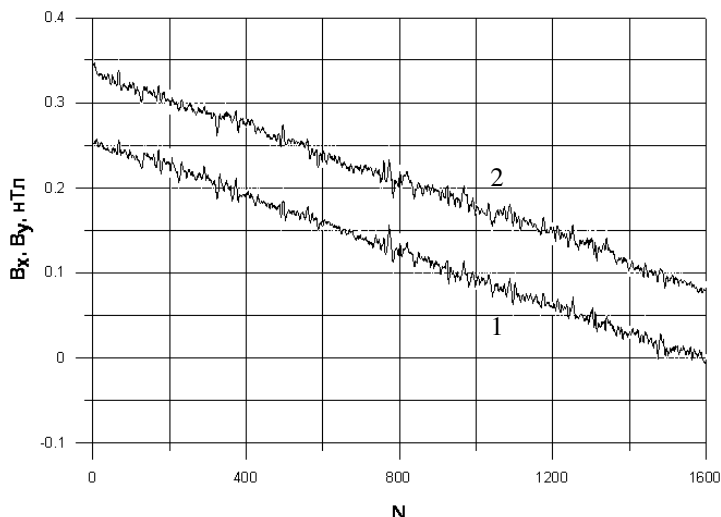


Рис. 3. Запись горизонтальных составляющих геомагнитного поля вдали от источников техногенных помех в условиях частичного экранирования: $V_x(1)$, $V_y(2)$; N – номера отсчетов АЦП, продолжительность записи – 12 с

му датчиков преобразователя. Если учесть синхронные вариации внешнего магнитного поля, то собственный магнитный шум магнитомодуляционного датчика должен быть несколько ниже $0,2 \cdot 10^{-12}$ Тл·Гц^{-1/2}.

Для надежной регистрации сигнала слабого магнитного поля примем отношение сигнала к шуму равное трем. Тогда порог чувствительности автопараметрического магнитомодуляционного датчика в диапазоне частот от 1 до 25 Гц можно считать равным $0,6 \cdot 10^{-12}$ Тл·Гц^{-1/2}.

При некотором удалении от зон экранирования геомагнитного поля его вариации, наоборот, многократно усиливались (рис. 4).

Порог чувствительности магнитомодуляционных датчиков с автопараметрическим усилением сигнала в аморфном ферромагнитном сердечнике в области низких

частот, полученный в зонах частичного экранирования, по-видимому, не является предельным. Тем не менее, и такой его уровень вполне достаточен для многих применений вне магнитно экранированного объема, поскольку внешние техногенные электромагнитные шумы и геомагнитные вариации, как правило, во много раз больше.

Теоретическая оценка энергетической чувствительности

Интересно сравнить энергетическую разрешающую способность магнитомодуляционного датчика с самым чувствительным к низкочастотному магнитному полю прибором – со сверхпроводящим квантовым интерференционным детектором (СКВИДом). Энергетическую разрешающую способность магнитомодуляционного датчика с автопараметрическим усилением

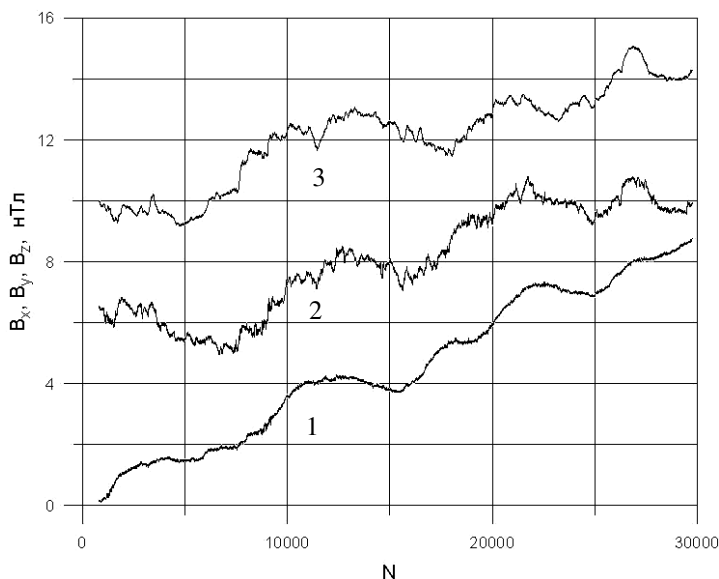


Рис. 4. Вариации составляющих геомагнитного поля $V_x(1)$, $V_y(2)$ и $V_z(3)$ за зоной экранирования; N – номера отсчетов АЦП, продолжительность записи – 77 с

в аморфном ферромагнитном сердечнике можно оценить следующим образом. Считая магнитную проницаемость аморфного ферромагнитного сердечника постоянной, так как сердечник находится в одном и том же магнитном поле, поддерживаемом системой отрицательной обратной связи, его удельную (на единицу объема) энергетическую чувствительность можно представить в виде:

$$\omega = \frac{1}{2\mu_0\mu^*} \int BdB . \quad (1)$$

Магнитная проницаемость вещества ферромагнитного сердечника из аморфного железо-кобальтового сплава с компенсированной продольной магнитострикцией $\mu \sim 5 \cdot 10^5 \div 10^6$, а магнитная проницаемость собственно ферромагнитного сердечника определяется по формуле (Афанасьев, 1986):

$$\mu^* = \frac{\mu}{1 + R(\mu - 1)},$$

где R – коэффициент размагничивания.

Коэффициент формы $m=R^{-1}$ для сердечника прямоугольной формы можно найти по формуле (там же):

$$m = \frac{\pi l^2}{4S \left(\ln \frac{3.6l}{a+b} - 1 \right)},$$

где l , a и b – длина, ширина и толщина сердечника, соответственно, а $S=a \cdot b$ – площадь его поперечного сечения. Примем среднюю величину магнитной проницаемости материала сердечника $\mu \sim 7,5 \cdot 10^5$; тогда, при размерах аморфного ферромагнитного сердечника $40 \times 0,5 \times 0,02$ мм, $m \approx 26936$. Следовательно, $\mu^* \approx 26000$.

Подставляя в (1) в качестве одного из пределов интеграла магнитное поле смещения, равное 10^{-5} Тл и постоянно поддерживаемое системой отрицательной обратной связи, и принимая минимальную вариацию магнитной индукции $\delta B \approx 0,6 \cdot 10^{-12}$ Тл, получаем удельную (на единицу объема) энергетическую чувствительность магнитомодуляционного датчика $\approx 1,8 \cdot 10^{-16}$ Дж/м³.

Учитывая объем сердечника, равный $\sim 4 \cdot 10^{-10}$ м³, получим минимальную энергетическую разрешающую способность магнитомодуляционного датчика с аморфным ферромагнитным сердечником $\sim 7 \cdot 10^{-26}$ Дж·с на частотах выше 1 Гц в полосе частот 1 Гц.

В то же время СКВИД-магнитометр с трансформатором потока практически удобных размеров (при малых сигналах) имеет минимальную энергетическую разрешающую способность $\sim 4,7 \cdot 10^{-32}$ Дж·с (Введенский, Ожогин, 1986).

Заключение

Если исходить из полученной оценки минимальной энергетической разрешающей способности, то автопараметрические магнитомодуляционные датчики с аморфным ферромагнитным сердечником в области низких частот должны иметь минимальный порог чувствительности по магнитной индукции, на несколько порядков худший порога чувствительности низкотемпературных СКВИД-магнитометров. Однако практически такой большой разницы не наблюдается. Что касается высокотемпературных СКВИД-магнитометров, то магнитомодуляционные датчики с аморфным ферромагнитным сердечником в области низких частот, как показывают результаты измерений в частично экранированном геомагнитном поле, им не уступают. При этом предел порога чувствительности магнитомодуляционных датчиков с автопараметрическим усилением сигнала в аморфном ферромагнитном сердечнике по магнитной индукции, по всей вероятности, еще не достигнут.

Литература

- Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 188 с.
 Введенский В.Л., Ожогин В.И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. М.: Наука, 1986. 200 с.
 Сокол-Кутыловский О.Л. Автопараметрический датчик магнитной индукции // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 37–38.