

личаются от приведенных в литературе. Закон распределения погрешности шума квантования на выходе ДСАЦП для разных входных сигналов имеет схожий вид, но при этом отличается как от закона распределения на выходе ДСМ, так и от нормального закона.

Тип применяемого ЦФ не оказывает существенного влияния на вид закона распределения погрешности шума квантования на выходе ДСАЦП, но влияет на параметры этого закона. Введенное понятие эквивалентной полосы ЦФ (в общем случае она отличается от принятых в литературе параметров) позволяет с приемлемой точностью оценивать СКО для ДСАЦП. Неопределенность погрешности шума квантования (неопределенность преобразования) получается путем умножения СКО на коэффициент, зависящий от доверительной вероятности, закона изменения входного сигнала и параметров ЦФ. Полученный диапазон может отличаться от нормального в два и более раз.

#### Л и т е р а т у р а

1. Диденко В. И., Иванов А. В. Метрологический подход к исследованию шума квантования // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 51—55; Didenko V. I., Ivanov A. V. A metrological approach to the investigation of the quantization noise of delta-sigma ADCs // Measurements Techniques. 2009. V. 52. N 5. P. 521—527.
2. Bennett W. R. Spectra of Quantized Signals // Bell Systems Techn. J. 1948. V. 27. P. 446—472.
3. Шахов Э. К.  $\Sigma\Delta$ -АЦП: процессы передискретизации, шейпинга шума квантования и децимации // Датчики и системы. 2006. № 11. С. 50—57.

4. Sigma-Delta ADC's&DAC's // Appl. Note AN-283. Analog Devices (USA), 1993 [Электрон. ресурс]. [http://www.analog.com/static/imported-files/application\\_notes/292524291525717245054923680458171AN283.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/292524291525717245054923680458171AN283.pdf) (дата обращения: 16.12.2012 г.).

5. Диденко В. И., Тепловодский А. В., Иванов А. В. Точность моделирования измерительных устройств // Датчики и системы. 2009. № 7. С. 56—62.

6. Didenko V. I., Ivanov A. V., Teplovodskiy A. V. New approach to theory of sigma-delta analog-to-digital converters // Proc. 15<sup>th</sup> IMECO TC4 Symp. and 12<sup>th</sup> Workshop on ADC Modelling and Testing. Iasi (Romania), 2007. P. 3—8.

7. Didenko V. I., Ivanov A. V. Distribution Laws of Quantization Noise for Sigma-Delta Modulator // Proc. 16<sup>th</sup> IMECO TC4 Symp. and 13<sup>th</sup> Workshop on ADC Modelling and Testing. Florence (Italy), 2008. P. 995—1000.

8. Didenko V. I., Movchan A. L. Minimization of number of metrological parameters for data acquisition systems // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 2002. V. 51. P. 88—91.

9. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979.

10. IEEE 1241:1996. Standard of terminology and test methods for analog-to-digital converters.

11. Massey F. J. The Kolmogorov—Smirnov test for goodness of fit // J. American Statistical Association. 1951. V. 46. N 253. P. 68—78.

12. Jarque C. M., Bera A. K. A test for normality of observations and regression residuals // Int. Statistical Rev. 1987. V. 55. N 2. P. 163—172.

Дата принятия 14.01.2013 г.

621.317.421:621.317.445

## Регистрация сверхслабого магнитного поля низкой частоты магнитомодуляционным датчиком

О. Л. СОКОЛ-КУТЫЛОВСКИЙ

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: s-k52@mail.ru

*Показано, что автопараметрический датчик магнитной индукции с сердечниками из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией в условиях малых внешних магнитных шумов на частотах выше 1 Гц может регистрировать магнитное поле амплитудой 0,3 пТл с максимальной плотностью шума на частотах выше 3 Гц, не превышающей  $0,2 \text{ пТл} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ .*

**Ключевые слова:** слабое магнитное поле, магнитомодуляционный датчик, аморфный ферромагнетик.

*It is shown that the magnetic modulation sensor with cores from amorphous ferromagnetic alloy with compensated longitudinal magnetostriction in conditions of small external magnetic noises at frequencies higher than 1 Hz is capable to register the magnetic field with amplitude 0,3 pT. The density of magnetic noise at frequencies above 3 Hz does not exceed  $0,2 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ .*

**Key words:** weak magnetic field, magnetic modulation sensor, amorphous ferromagnetic.

Исследования физических свойств аморфных ферромагнитных сплавов, полученных из расплава методом быстрой закалки, выявили их уникальные магнитные и магнитоупругие характеристики. Это позволило на основе аморфных ферромагнетиков создать магнитомодуляционные датчики,

предназначенные для обнаружения и измерения переменного магнитного поля низких частот (от 0,01 Гц до 100 кГц) в динамическом диапазоне измерений  $10^{-11}$  —  $10^{-4}$  Тл [1]. При этом порог чувствительности, как правило, был ограничен уровнем внешнего магнитного шума и шумом, создаваемым

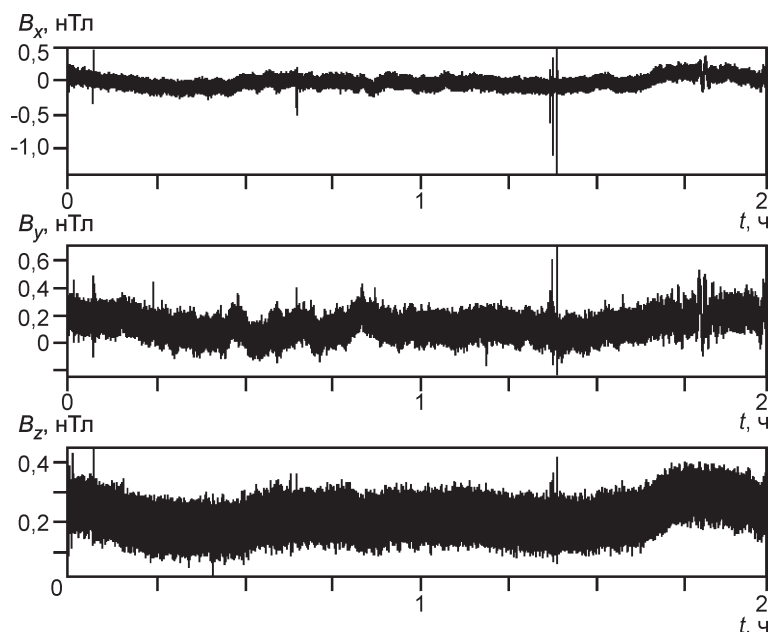


Рис. 1. Запись сигнала трех составляющих магнитной индукции в удаленном от техногенных помех районе

электронной схемой магнитомодуляционного преобразователя. Многолетний опыт работы с такими датчиками показал, что собственный магнитный шум сердечников из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией, работающих в режиме автопараметрического усиления, в некоторых случаях может быть меньше  $10^{-12}$  Тл [2].

На частотах ниже 0,01 Гц и при измерении постоянного магнитного поля магнитомодуляционные датчики уступают феррозондам, работающим на второй гармонике частоты возбуждения. Это связано с достаточно высокой стабильностью индукции насыщения сердечников феррозондов, в то время как в магнитомодуляционном датчике проблематично поддерживать рабочую точку ферромагнетика, намагничиваемого относительно высокочастотным магнитным полем по частной петле. Однако на частотах выше 0,01 Гц отсутствие коммутационных шумов позволяет получить в магнитомодуляционных датчиках более низкий порог чувствительности по сравнению с феррозондами, сердечники которых работают с полным перемагничиванием по предельной петле. Кроме того, применение аморфных сплавов с компенсированной продольной магнитострикцией в магнитомодуляционных датчиках позволяет использовать автопа-

раметрическое усиление сигнала измеряемого магнитного поля непосредственно в сердечнике датчика и обеспечивать достаточно высокий коэффициент преобразования [1], т. е. создавать относительно простые высокочувствительные магнитомодуляционные датчики низкочастотного диапазона.

Магнитомодуляционные датчики весьма чувствительны к внешним магнитным шумам, в частности высокочастотным, если высокочастотное магнитное поле оказывается модулированным любым сигналом низкой частоты, попадающим в полосу измеряемых частот датчика [3]. Поэтому реализовать предельную чувствительность датчиков можно только в условиях минимальных внешних магнитных шумов во всем диапазоне эффективной восприимчивости аморфных ферромагнитных сердечников (до 1—5 МГц).

Для прямого измерения уровня собственного магнитного шума магнитомодуляционного преобразователя требуется весьма большой электромагнитный экран, так как вне экранированного объема короткопериодные вариации магнитного поля Земли даже вдали от крупных городов составляют 0,2—0,4 нТл (от пика до пика) и более, что соответствует уровню внешнего магнитного шума 5—10 нТл · Гц<sup>-1/2</sup> в диапазоне частот 1—10 Гц. Много-

слойный магнитный экран из магнитомягких ферромагнитных материалов эффективно экранирует постоянное магнитное поле (ослабляет его в  $10^3$ — $10^5$  раз вдоль оси экрана), но почти не подавляет переменное магнитное поле низких частот. Кроме того, магнитный и электромагнитный экраны относительно малого размера создают широкополосный магнитный шум, который на частотах ниже 20 Гц и на расстоянии 10 см от стенки экрана составляет 0,25 пТл, а на расстоянии 1 см может достигать 2,5 пТл [4].

**Методика эксперимента.** Современные цифровые методы накопления и обработки сигналов позволяют в ряде случаев решить проблему определения пороговой чувствительности датчиков слабого магнитного поля без применения сложных экранирующих устройств или активных систем компенсации внешних магнитных помех. Для этого необходимо провести достаточно длительную запись амплитуды магнитного поля низкой частоты в удаленном от техногенных помех районе при спокойном геомагнитном фоне. Спектр шума внешнего магнитного поля в низкочастотном диапазоне представляет собой так называемый «розовый» или шум типа  $1/f$ , амплитуда которого возрастает с понижением частоты. При накоплении достаточно большого числа периодов сигнала слабого магнитного поля внешний магнитный шум, распределенный по спектру случайным образом, усредняется и снижается пропорционально корню квадратному из частоты во всей полосе пропускания датчика.

Порогом чувствительности датчика магнитного поля можно считать магнитную индукцию, надежно выделяемую за разумное время измерения ( $10^3$ — $10^4$  с) на фоне спектра магнитного шума. При этом должно быть обеспечено необходимое разрешение по амплитуде аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

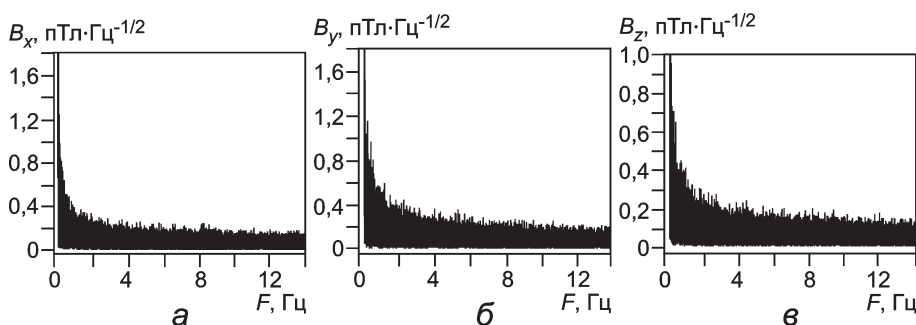


Рис. 2. Фрагменты спектров магнитного шума, записанных в диапазоне частот пропускания датчика

В качестве измерителя слабого магнитного поля был применен магнитомодуляционный преобразователь магнитной индукции с сердечниками из аморфного ферромагнитного сплава  $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  с компенсированной продольной магнитострикцией, работающий в режиме автопараметрического усиления. Длина сердечников 40 мм, ширина 1 мм, толщина 0,02 мм. Коэффициент преобразования собственно датчика преобразователя 0,2 и 71 мВ/нТл с дополнительным усилением сигнала. При этом полоса пропускания была ограничена снизу и сверху частотами 0,01 и 36 Гц, соответственно. Для оцифровки аналогового выходного сигнала применялся 24-разрядный АЦП AD7734 с динамическим диапазоном  $\pm 10$  В и временем дискретизации 7,2 мс.

**Результаты измерений.** На рис. 1 показана двухчасовая запись трех взаимно ортогональных составляющих магнитной индукции, осуществленная в ночное время в удаленном от техногенных помех районе. По данным магнитной обсерватории Арти, в районе которой проводились измерения, геомагнитное поле было спокойным. Как и следовало ожидать, в случае геомагнитных вариаций ширина шумовой дорожки вертикальной составляющей вектора магнитной индукции ( $B_z \approx 0,2$  нТл) оказалась меньше ширины шумовой дорожки горизонтальных составляющих ( $B_x \approx B_y \approx 0,3$  нТл). При воздействии техногенного магнитного шума вертикальная составляющая, как правило, превышает шумы горизонтальных составляющих вектора магнитной индукции.

На рис. 2 представлены начальные фрагменты спектров магнитного шума трех составляющих вектора магнитной индукции при времени накопления сигнала в течение двух часов. Амплитуда магнитного шума складывается из внешнего геомагнитного шума и собственного шума магнитомодуляционного преобразователя. Практически равномерное увеличение плотности шума на большей части диаграммы частично обусловлено следующим: чем ниже частота, тем меньшее число периодов сигнала усредняется при накоплении. И лишь в области самых низких частот происходит резкий рост плотности магнитного шума, связанный с внешними и внутренними источниками шума типа  $1/f$ .

На рис. 3 показан фрагмент диаграммы плотности магнитного шума вертикальной составляющей вектора магнитной индукции при частотах до 2 Гц. Пиковые значения плотности магнитного шума на частоте 3 Гц не превышают  $0,2 \cdot 10^{-12}$  Тл  $\cdot$  Гц $^{-1/2}$ , на частоте 1 Гц они возрастают до  $0,3 \cdot 10^{-12}$  Тл  $\cdot$  Гц $^{-1/2}$  и увеличиваются до  $1 \cdot 10^{-12}$  Тл  $\cdot$  Гц $^{-1/2}$  лишь на частотах менее 0,05 Гц.

**Заключение.** Из результатов проведенных измерений следует, что в спокойной геомагнитной обстановке при накоплении сигнала внешнего магнитного поля без магнитно-

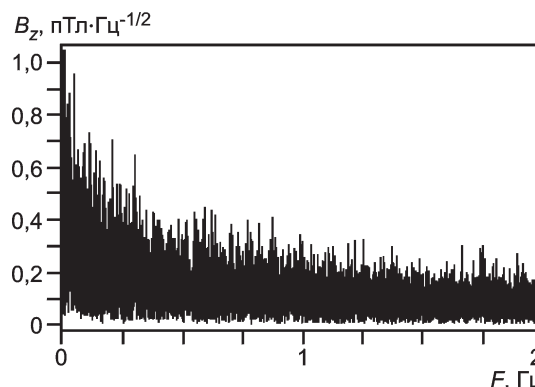


Рис. 3. Фрагмент диаграммы плотности магнитного шума вертикальной составляющей вектора магнитной индукции в низкочастотной области спектра

го экранирования автопараметрический преобразователь магнитной индукции на основе датчика из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией способен надежно фиксировать переменное магнитное поле низкой частоты на уровне 0,3 пТл на частоте 1 Гц и 0,2 пТл на частотах выше 3 Гц, что значительно ниже порога чувствительности лучших феррозондовых приборов в том же диапазоне частот. Полученный уровень плотности магнитного шума обусловлен как внешними, так и внутренними причинами, поэтому минимальный уровень собственного магнитного шума сердечников датчика, по всей вероятности, еще не достигнут.

## Л и т е р а т у р а

1. **Сокол-Кутыловский О. Л.** Автопараметрический датчик магнитной индукции // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 37—38.
2. **Сокол-Кутыловский О. Л.** Разрешающая способность магнитомодуляционных датчиков с аморфным ферромагнитным сердечником // Измерительная техника. 2011. № 3. С. 55—57; **Sokol-Kutylovskii O. L.** The resolving power of magneto-modulation sensors with an amorphous ferromagnetic core // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 3. P. 55—57.
3. **Сокол-Кутыловский О. Л.** Влияние амплитудно-модулированного высокочастотного магнитного поля на низкочастотный шум аморфного ферромагнитного датчика // Метрология. 2012. № 6. С. 39—44.
4. **Введенский В. Л., Ожогин В. И.** Сверхчувствительная магнитометрия и биомagnetизм. М.: Наука, 1986.

Дата принятия 31.10.2012 г.