

## Магнитомодуляционный преобразователь для измерения слабого низкочастотного магнитного поля

О. Л. Сокол-Кутыловский

*Приведено краткое описание магнитомодуляционного преобразователя с датчиком из аморфного ферромагнитного сплава, предназначенного для измерения слабого магнитного поля низких частот. Для увеличения чувствительности и снижения уровня собственных шумов в преобразователе использован эффект автопараметрического усиления сигнала магнитной индукции в аморфном ферромагнитном сердечнике с компенсированной продольной магнитострикцией. Показано, что магнитомодуляционный преобразователь способен надежно регистрировать периодические сигналы магнитной индукции с амплитудой менее 1 нТл в диапазоне частот измеряемого магнитного поля выше 0,1 Гц. Магнитомодуляционный преобразователь был опробован в геофизических измерениях, но может быть применен и в других областях научно-технических исследований.*

*Ключевые слова:* магнитомодуляционный преобразователь, аморфный ферромагнитный сплав, автопараметрическое усиление, датчик магнитного поля.

### Введение

Для измерения слабого магнитного поля низких частот в геофизике обычно применяют индукционные датчики, которые имеют достаточно большие размеры и вес, требуют повышенной защиты от ветровых помех и вибрации. Предполагалось, что совершенствование феррозондовых магнитометров и применение в них новых магнитных материалов позволит во многих случаях заменить индукционные датчики [1], однако этого не произошло. Феррозонды, работающие на второй гармонике частоты возбуждения, по порогу чувствительности существенно уступают индукционным датчикам. Самые высокочувствительные векторные магнитометры, основанные на эффекте Джоузефсона в сверхпроводниках (т. н. СКВИДы [2]), применяемые в магнитобиологии и медицине, широкого распространения в других областях не получили из-за их дороговизны и сложности в эксплуатации, так как они работают при температуре жидкого гелия.

Появившиеся недавно высокотемпературные СКВИДы [3] могут работать при температуре

жидкого азота, но также неудобны в эксплуатации и пока значительно уступают низкотемпературным СКВИДам по порогу чувствительности в области низких частот. Тем не менее, давно известны магнитомодуляционные датчики с сердечником из аморфного ферромагнитного сплава, которые близки феррозондовым приборам по принципу работы, но в которых нет полного перемагничивания сердечника вспомогательным переменным магнитным полем [4]. Магнитомодуляционные датчики, работающие на первой гармонике частоты возбуждения, уступают феррозондам второй гармонике по точности измерения постоянного магнитного поля, но при измерении переменного магнитного поля их уровень собственных шумов может быть значительно ниже.

Дальнейшее повышение чувствительности магнитомодуляционных датчиков на основе аморфных ферромагнитных сплавов стало возможным благодаря эффекту автопараметрического усиления в колебательном контуре с аморфным ферромагнитным сердечником, описанному автором в работах [5–9]. Эффект автопараметрического усиления в аморфном ферромагнитном сердечнике возникает по причине исключительно высокого магнитоупругого взаимодействия в аморфных ферромагнитных сплавах, полученных методом быстрой закалки из расплава [10]. На низких частотах собственные шумы магнитомодуляционных датчиков с автопараметрическим усилением приближаются к шумам индукционных датчиков и высокотемпературных СКВИДов [9].

Сокол-Кутыловский Олег Леонидович, старший научный сотрудник, д.т.н.

Институт геофизики Уральского отделения РАН,  
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.  
E-mail: s-k52@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 июня 2017 г.

© Сокол-Кутыловский О. Л., 2017

Целью данной работы являлось практическое создание и исследование магнитомодуляционного преобразователя с датчиком из аморфного ферромагнитного сплава, предназначенного для измерения слабого магнитного поля низких частот, в котором для увеличения чувствительности и снижения уровня собственных шумов использован эффект автопараметрического усиления сигнала магнитной индукции в аморфном ферромагнитном сердечнике с компенсированной продольной магнитострикцией.

### Блок-схема магнитомодуляционного преобразователя

Магнитомодуляционный преобразователь (ММП) работает в режиме автопараметрического усиления сигнала, которое в аморфном ферромагнитном сердечнике (АФС) достигается выбором амплитуды возбуждения, величиной магнитного поля смещения и параметрами приемного колебательного контура [6, 7]. Возбуждение АФС осуществляется кварцевым генератором КГ при помощи катушки возбуждения  $L_2$  (см. рис. 1). Сигнал частоты возбуждения, который модулирован измеряемым сигналом магнитного поля низких частот, снимается с приемного колебательного контура  $L_1C_1$ .

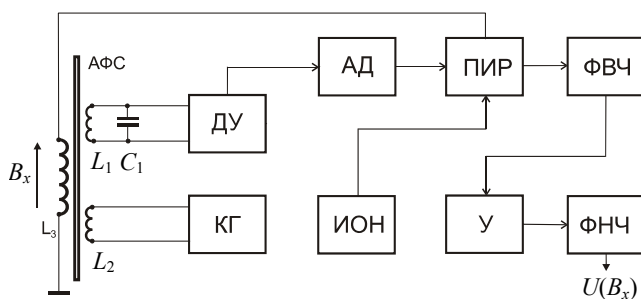


Рис. 1. Блок-схема одного канала магнитомодуляционного преобразователя. АФС – аморфный ферромагнитный сердечник,  $L_1C_1$  – приемный колебательный контур,  $L_2$  – катушка возбуждения,  $L_3$  – катушка обратной связи, ДУ – дифференциальный усилитель, АД – амплитудный детектор, ПИР – пропорционально интегрирующий регулятор, ФВЧ – фильтр высоких частот, ИОН – не инвертирующий усилитель, ФНЧ – фильтр низких частот, КГ – кварцевый генератор, ИОН – источник опорного напряжения,  $U(B_x)$  – выходное напряжение, пропорциональное составляющей магнитной индукции  $B_x$ , совпадающей с продольной осью сердечника.

Далее этот сигнал усиливается и поступает на амплитудный детектор АД, после чего поступает на вход электронного регулятора ПИР. Датчики ММП работают в отличающемся от нулевого магнитном поле (режим со смещенной рабочей точ-

кой), поэтому точность преобразования и стабильность работы прямо зависят от точности установки и поддержания магнитного поля смещения. Рабочая точка, соответствующая магнитному полю смещения, при котором достигается необходимое автопараметрическое усиление в АФС, устанавливается с помощью опорного напряжения ИОН и автоматически поддерживается ПИР через катушку обратной связи по магнитному полю,  $L_3$ . Выходной сигнал ПИР, пропорциональный величине измеряемой составляющей внешнего магнитного поля относительно магнитного поля смещения, подается на ФВЧ (чтобы отсечь постоянную составляющую сигнала с частотами до 0,01–0,05 Гц), дополнительно усиливается по амплитуде и проходит через ФНЧ для удаления остаточного сигнала частоты модуляции. На выходе ММП получаем электрический сигнал  $U(B_x)$ , пропорциональный измеряемой магнитной индукции, который имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику в диапазоне частот от 0,05 Гц до 200 Гц. При необходимости диапазон частот измеряемого магнитного поля может быть увеличен до 0,1 частоты модуляции выбором более высокой частоты кварцевого генератора и изменением параметров ПИР и ФНЧ. ММП работает при температуре до 340 К.

В качестве сердечника датчиков была применена лента из аморфного ферромагнитного сплава базового состава  $Fe_5Co_{70}Si_{10}B_{15}$  с компенсированной продольной магнитострикцией, полученная методом быстрой закалки из расплава и, для снятия остаточных механических напряжений, кратковременно отожженная в продольном магнитном поле вблизи температуры Кюри. Длина аморфного сердечника датчика ММП равна 40 мм, ширина – 0,8 мм, толщина – 0,02 мм. Кварцевый генератор содержит систему автоматической регулировки амплитуды, а его частота равна 256 кГц. Коэффициент преобразования ММП по переменному магнитному полю равен коэффициенту преобразования по постоянному магнитному полю (0,15 мВ/нТл), умноженному на коэффициент усиления усилителя (ИОН на рис. 1), и составляет 60 мВ/нТл в диапазоне частот измерения магнитной индукции от 0,05 Гц до 200 Гц. Динамический диапазон измерений переменного магнитного поля достигает 400 нТл (от пика до пика).

ММП имеет три идентичных канала измерения, один из которых показан на рис. 1. Выходные сигналы измерительных каналов ММП поступали на 24-разрядный трехканальный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и записывались на переносный компьютер.

### Примеры измерений магнитного поля с помощью ММП

На рис. 2 показаны фрагменты записи магнитного шума одной из горизонтальных составляющих в спокойном геомагнитном поле в районе, удаленном от техногенных помех, при различной полосе пропускания ММП.

Из записей на рис. 2 следует, что в спокойном геомагнитном поле вне экранированного объема в режиме реального времени (без накопления сигнала) можно надежно зафиксировать сигнал магнитного поля, который превышает величину геомагнитного шума в  $1,5 \div 2$  раза, то есть  $0,3 \div 0,4$  нТл от пика до пика при полосе пропускания 30 Гц. При сужении полосы пропускания до 1 Гц, например, на частоте 10 Гц, как это показано на рис. 2, в спокойном геомагнитном поле можно обнаружить сигнал магнитного поля с амплитудой от  $0,03 \div 0,04$  нТл и

выше. Следует иметь в виду, что в возмущенном геомагнитном поле, особенно в присутствии техногенных электромагнитных помех, результаты измерения слабого магнитного поля будут значительно хуже. Так как датчики ММП всегда находятся в постоянном поле Земли, то, кроме внешнего магнитного шума, достаточно сильное негативное влияние на векторные измерения слабого магнитного поля оказывает механическая вибрация, включая ветровые помехи.

Более слабые периодические сигналы магнитного поля вне экранированного объема можно измерить при помощи ММП только путем накопления или синхронного детектирования.

На рис. 3 показано распределение геомагнитного шума в полосе частот до 30 Гц при накоплении сигнала в течение трех часов. Верхняя частота геомагнитного поля была ограничена временем дискретизации АЦП, которое было равным 7,2 мс.

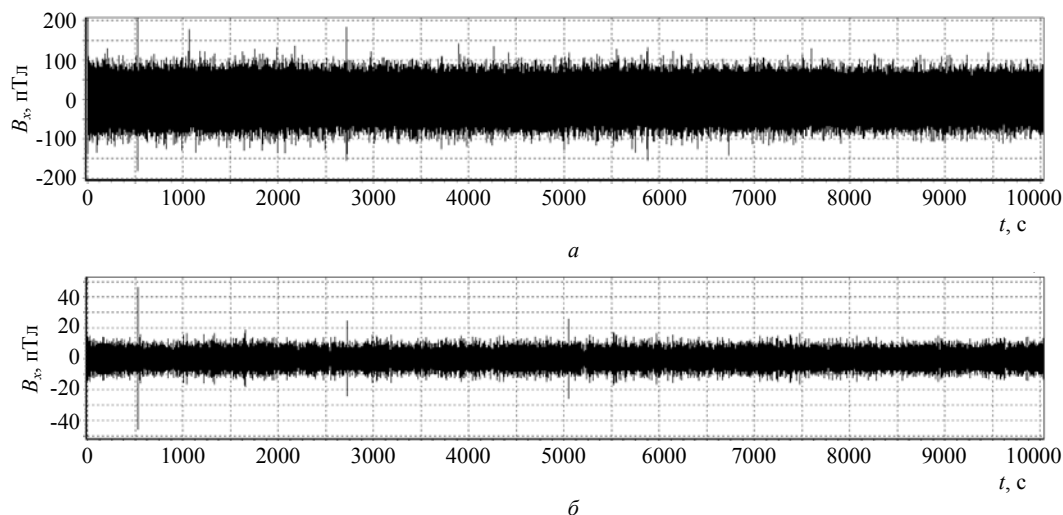


Рис. 2. Фрагмент записи амплитуды геомагнитного шума в полосе пропускания  $0,05 \div 30$  Гц (а) и этот же фрагмент записи амплитуды геомагнитного шума на частоте 10 Гц в полосе пропускания 1 Гц (б).

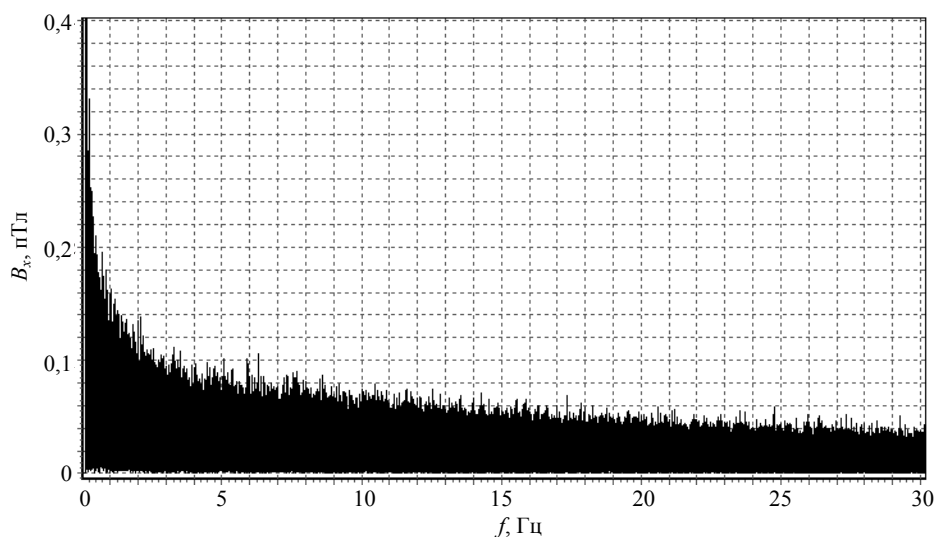


Рис. 3. Распределение средней амплитуды геомагнитного шума по частотам при накоплении сигнала в течение трех часов в спокойном геомагнитном поле.

В спокойном геомагнитном поле амплитуда геомагнитного шума на частоте 1 Гц составляет около 0,16 пТл, а на частоте 30 Гц – снижается до 0,04 пТл, что соответствует спектральной плотности магнитного шума на этих частотах 0,16 пТл Гц<sup>-1/2</sup> и 0,007 пТл Гц<sup>-1/2</sup> соответственно. Это ориентировочные нижние пределы измерения магнитного поля на фоне спокойного геомагнитного поля в местах, удаленных от техногенных помех, при накоплении периодических сигналов магнитного поля в течение нескольких часов. Так как амплитуда магнитного шума снижается при дальнейшем увеличении времени накопления, то

из записи, показанной на рис. 3, следует, что на ней отображен преимущественно шум геомагнитного поля, а не собственный шум ММП.

На рис. 4 приведен Фурье-спектр амплитуды вертикальной составляющей магнитного шума в присутствии слабых сигналов техногенного происхождения в точке измерения. Точка измерения находилась в нескольких километрах от небольшого поселка и местной линии электропередач. Средняя амплитуда магнитного поля частоты 50 Гц составила 1,24 пТл, а на частотах до 3 Гц видны повышенные шумы.

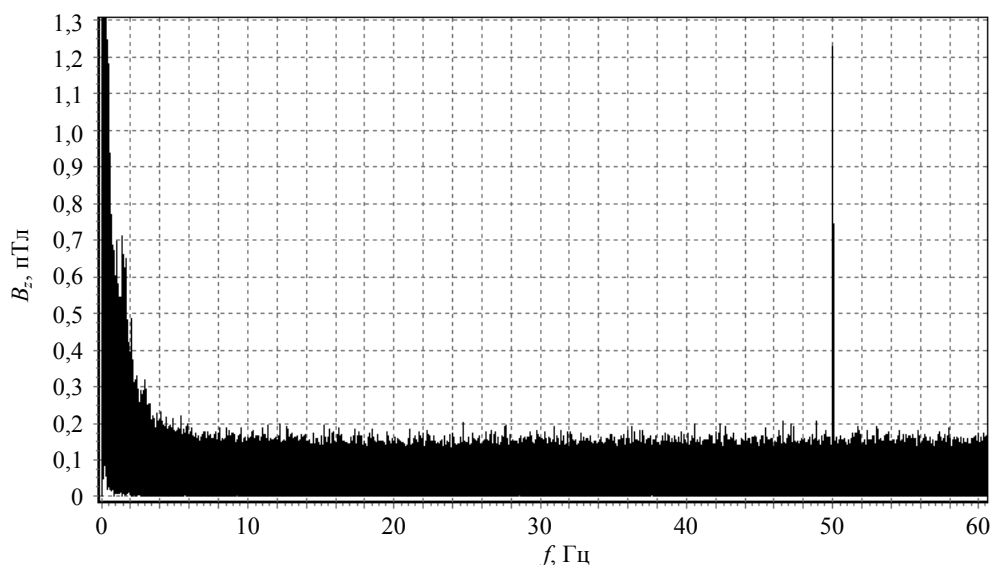


Рис. 4. Распределение средней амплитуды магнитного шума по частоте при накоплении в течение трех часов в присутствии слабого сигнала промышленной частоты 50 Гц от удаленных источников.

Общий геомагнитный шум вертикальной составляющей геомагнитного поля на рис. 4 в несколько раз выше, чем магнитный шум на рис. 3, полученный в более спокойном геомагнитном поле в другое время и другом месте, что частично объясняется более широкой полосой пропускания (220 Гц при времени дискретизации около 2 мс для этой записи). По горизонтальной составляющей геомагнитного поля, направленной по магнитному меридиану, на частоте 220 Гц амплитуда геомагнитного шума составила 0,08 пТл (от пика до пика), что соответствует спектральной плотности геомагнитного шума на этой частоте  $\sim 0,005$  пТл Гц<sup>-1/2</sup>.

### Заключение

ММП имеет небольшие размеры и вес, что является существенным преимуществом по сравнению с индукционными датчиками, предназначенными для измерения слабого магнитного поля низких частот. Кроме того, ММП имеет плоскую

амплитудно-частотную характеристику в заданной полосе частот пропускания, что значительно упрощает обработку массива измеряемых сигналов магнитной индукции.

По сравнению с феррозондовыми приборами, в которых измеряемый сигнал переносится на вторую гармонику частоты возбуждения, ММП имеет на один-два порядка меньший уровень собственных магнитных шумов.

Так как собственный магнитный шум ММП ниже уровня шума спокойного геомагнитного поля, то это позволяет применять ММП для любых измерений слабого магнитного поля низких частот вне магнитно-экранированного объема.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы – Л.: Энергоатомиздатб 1986.
2. Введенский В. Л., Ожогин В. И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. – М.: Наука, 1986.

3. Фалей М. И., Масленников Ю. В., Кошелец В. П. // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 1. С. 93.
4. Sonoda T., Ueda R., Ikemoto H, Kudo K., Kajiwara K. // IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 25. No. 5 (Sept. 1989). P. 3396.
5. Sokol-Kutylovskij O. L. // Sensors and Actuators: A. Physical. 1997. Vol. 62/1-3 P. 496.
6. Сокол-Кутыловский О. Л. // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 37.
7. Сокол-Кутыловский О. Л. // Измерительная Техника. 2011. № 3. С. 55.
8. Сокол-Кутыловский О. Л. // Измерительная Техника. 2013. № 4. С. 61.
9. Сокол-Кутыловский О. Л. // Измерительная Техника. 2016. № 2. С. 46.
10. Сокол-Кутыловский О. Л. // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5 (47). Ч. 3. С. 176.

PACS: 93.85.Jk

## Magnetovariational converter to measure weak low frequency magnetic fields

O. L. Sokol-Kutylovskii

Institute of Geophysics of the Ural Branch of the RAS  
100 Amundsen str., Ekaterinburg, 620016, Russia  
E-mail: s-k52@mail.ru

Received June 15, 2017

***A brief description of a magnetomodulation transducer with a sensor made of an amorphous ferromagnetic alloy for measuring a weak magnetic field of low frequencies is given. To increase the sensitivity and reduce the level of intrinsic noise, the converter uses the effect of an autoperametric amplification of the magnetic induction signal in an amorphous ferromagnetic core with compensated longitudinal magnetostriction. It is shown that the magnetomodulation converter is capable of reliably detecting periodic magnetic induction signals with an amplitude of less than 1 pT in the frequency range of the measured magnetic field above 0.1 Hz. The magnetomodulation transducer has been tested in geophysical measurements, but can be applied in other areas of scientific and technical research.***

**Keywords:** magnetomodulation transducer, amorphous ferromagnetic alloy, autoperametric amplification, magnetic field sensor.

### REFERENCES

1. Yu. V. Afanasyev, *Ferroprobe Devices*. (L.: Energoatomizdat, 1986) [in Russian].
2. V. L. Vvedenskiy and V. I. Ozhogin, *Supersensitive Magnetometry*. (Moscow, Nauka. 1986) [in Russian].
3. M. I. Faley, Y. V. Maslennikov, and V. P. Koshelets, *J. Communications Technology and Electronics*, **61** (1), 86 (2016).
4. T. Sonoda, R. Ueda, H. Ikemoto, K. Kudo, and K. Kajiwara, *IEEE Transactions on Magnetics*, **25** (5), 3396 (1989).
5. O. L. Sokol-Kutylovskij, *Sensors and Actuators: A. Physical*, **62/1-3**, 496 (1997).
6. O. L. Sokol-Kutylovskii, *Datchiki i Sistemy*, No. 1, 37 (2009).
7. O. L. Sokol-Kutylovskii, *Measurement Techniques*, **54** (3), 55 (2011).
8. O. L. Sokol-Kutylovskii, *Measurement Techniques*, **56** (4), 447 (2013).
9. O. L. Sokol-Kutylovskii, *Measurement Techniques*, **59** (2), 170 (2016).
10. O. L. Sokol-Kutylovskii, *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. No. 5 (47), part 3, 176 (2016).