

## МАГНИТНЫЙ ШУМ ФЕРРОЗОНДОВ И МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ С АМОРФНЫМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

© 2021 г. О. Л. Сокол-Кутыловский\*

Институт геофизики УрО РАН  
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100  
\*e-mail: s-k52@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2021 г.  
После доработки 09.04.2021 г.  
Принята к публикации 15.04.2021 г.

Отмечено, что основная часть магнитного шума в феррозондах и магнитомодуляционных датчиках с сердечниками из аморфных ферромагнитных сплавов, полученных методом быстрой закалки, возникает в результате сильного магнитоупругого взаимодействия. Рассмотрены последние достижения в снижении порога чувствительности активных датчиков слабого магнитного поля на основе аморфных ферромагнетиков. Выполнена оценка средней амплитуды магнитного шума магнитомодуляционных датчиков с аморфным ферромагнитным сердечником, работающих в режиме автопараметрического усиления. Показано, что средняя амплитуда магнитного шума магнитомодуляционных датчиков может составлять  $\sim 0.45$  пТл на частоте 0.1 Гц и менее 0.1 пТл на частотах выше 3 Гц.

DOI: 10.31857/S0032816221050128

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ленты и провода из аморфных ферромагнитных сплавов, полученные методом быстрой закалки из расплава, широко используются в активных преобразователях магнитной индукции — феррозондах и магнитомодуляционных датчиках (м.м.д.). Это связано с хорошими магнитными, электрическими и механическими характеристиками аморфных ферромагнетиков: высокой магнитной проницаемостью ( $\mu \sim 10^5 - 10^6$ ), малой коэрцитивной силой ( $H_c \sim 0.2$  А/м), более высоким, по сравнению с пермаллоем, удельным электрическим сопротивлением ( $(1.3 - 1.4) \cdot 10^{-6}$  Ом · м), а также стабильностью магнитных свойств после механических ударов и деформации. Сердечники из аморфных ферромагнитных сплавов могут работать на достаточно высокой частоте модуляции и имеют низкие потери на перемагничивание ( $\sim 0.03$  Вт/кг). Кроме этого, ленты из аморфных ферромагнитных сплавов, полученные методом быстрой закалки из расплава, имеют уникальные магнитомеханические характеристики. Это в полной мере относится как к магнитострикционным сплавам ( $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{10}\text{B}_{12}$ ,  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$  и др.), так и к железобальтовым аморфным ферромагнитным сплавам с компенсированной продольной магнитострикцией. В отличие от кристаллических ферромагнетиков, аморфные ферромагнетики, полученные методом быстрой закалки, имеют высокое относительное изменение модуля упругости

под действием магнитного поля ( $\Delta E/E \sim 4.5$ ), а их предельно высокий коэффициент магнитомеханической связи обеспечивает эффективное прямое и обратное магнитоупругое взаимодействие. Магнитное поле и механическое напряжение в аморфных лентах, полученных методом быстрой закалки из расплава, являются действующими факторами первого порядка по отношению к магнитному состоянию аморфного ферромагнетика. Т.е. механическое напряжение, приложенное к аморфному ферромагнитному сердечнику, может обратно довести его до состояния, подобного насыщению внешним магнитным полем.

Применение аморфных ферромагнетиков в феррозондах улучшило многие их технические характеристики, но предполагаемого многократного снижения порога чувствительности не произошло. Причиной этого оказался высокий уровень магнитного шума аморфных ферромагнитных сердечников, наблюдаемый в феррозондах, выполненных по классическим схемам.

### 2. ШУМ АМОРФНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ В ФЕРРОЗОНДАХ

Аморфный ферромагнитный сердечник в феррозондах с периодическим насыщением в каждом периоде модуляции дважды испытывает сильное магнитное воздействие, которое в результате прямого магнитоупругого взаимодействия вызывает в нем упругий удар. В результате такого воздей-

ствия в сердечнике возбуждаются все возможные резонансы механических колебаний. Из-за сильной магнитомеханической связи в аморфном ферромагнитном сердечнике возникает также обратное упругомагнитное преобразование, в результате которого вызванный акустический шум добавляется к собственным магнитным шумам сердечника феррозонда. Учитывая, что акустический шум имеет стохастический характер и зависит от магнитного и упругого состояния сердечника, избавиться от него или как-то его учесть является трудновыполнимой задачей. Попытки снизить влияние магнитоупругого взаимодействия в аморфном ферромагнитном сердечнике путем его жесткой фиксации приводят к появлению в нем внутренних упругих напряжений, что ухудшает магнитные характеристики.

В последнее время появились сообщения о феррозондах, имеющих на порядок меньший магнитный шум по сравнению с классическими феррозондовыми магнетометрами. Это феррозонды с ортогональным возбуждением сердечника, в которых, в дополнение к возбуждению аморфного ферромагнитного сердечника протекающим по нему переменным электрическим током, добавлен постоянный электрический ток смещения. Такой принцип снижения собственного магнитного шума был применен в [1], где сердечник был выполнен из аморфного ферромагнитного провода диаметром 0.12 мм и длиной 35 мм на основе кобальта. В другом феррозонде с ортогональным возбуждением сердечник был изготовлен из ленты аморфного ферромагнитного сплава Metglas 2714A шириной 1 мм. При увеличении постоянного электрического тока смещения в аморфной ферромагнитной ленте до 0.2 А и выше магнитный шум феррозонда уменьшался до 1 пТл/Гц<sup>1/2</sup> на частоте 1 Гц [2]. В работе [3] описаны феррозондовые магнитометры с ортогональным возбуждением с одним и с четырьмя U-образными сердечниками из аморфного провода с компенсированной магнитострикцией (Co<sub>0.94</sub>Fe<sub>0.06</sub>)<sub>72.5</sub>Si<sub>12.5</sub>B<sub>15</sub> диаметром 0.12 мм. На квадрупольном датчике был получен уровень шума 1 пТл/Гц<sup>1/2</sup> на частоте 20 Гц. Аналогичный феррозондовый магнитометр с четырьмя аморфными отоженными ферромагнитными проволоками представлен в [4]. Уровень шума, полученный в разомкнутом и замкнутом контуре обратной связи, на частоте 1 Гц составил всего 0.75 и 0.6 пТл(rms)/Гц<sup>1/2</sup> соответственно.

Таким образом, наметившиеся в последнее время способы снижения порога чувствительности феррозондов связаны с переводом их в режим работы, когда аморфный ферромагнитный сердечник постоянно находится в магнитном поле смещения в состоянии, близком к магнитному насыщению.

### 3. М.М.Д. С АВТОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ УСИЛЕНИЕМ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Известны м.м.д. с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции в сердечнике из аморфного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией [5]. Автопараметрический резонанс возникает в колебательном LC-контуре с аморфным ферромагнитным сердечником при определенном соотношении частоты и амплитуды возбуждения колебательного LC-контра, а также при определенной величине внешнего магнитного поля. Если частота возбуждения колебательного контура не изменяется, то амплитуда напряжения на LC-контуре в выбранной рабочей точке в области резонанса будет функцией внешнего магнитного поля. Коэффициент преобразования магнитной индукции в амплитуду напряжения на LC-контуре может быть очень высоким при установлении рабочей точки вблизи резонансного пика.

Принцип действия м.м.д. с автопараметрическим усилением был опубликован в [6], а его принципиальная электрическая схема представлена в [7]. Такие м.м.д. применялись в геофизических исследованиях. Коэффициент преобразования м.м.д. с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции, работающего в магнитном поле Земли при произвольной ориентации, устанавливался в пределах 100–150 мкВ/нТл. При уменьшении динамического диапазона измерений коэффициент преобразования может быть увеличен до 10 мВ/нТл. При этом можно фиксировать переменное магнитное поле частотой от  $\sim 10^{-2}$  до  $10^3$  Гц и выше.

В м.м.д. применялись ленты из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией Fe<sub>5</sub>Co<sub>70</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>10</sub> шириной 0.6–0.8 мм и толщиной 0.02–0.025 мм. Аморфные сердечники подвергались термомагнитной обработке и подбору по параметрам на рабочем макете. Для работы в магнитном поле Земли длина сердечника должна быть 40–50 мм. При уменьшении длины сердечника возрастает величина магнитного поля смещения, в результате чего возникает необходимость в отдельном прецизионном источнике постоянного тока для создания магнитного поля смещения, превышающего земное магнитное поле.

Слабое гармоническое возбуждение м.м.д. осуществляется по частной петле и полностью не намагничивает сердечник, поэтому в нем отсутствуют шумы, подобные шумам феррозондов с периодическим насыщением сердечника. При возбуждении аморфного ферромагнитного сердечника м.м.д., вследствие четности магнитоупругого преобразования, в нем всегда появляются четные гармоники частоты модуляции, которые являются необходимым условием возникновения

автопараметрического усиления. Постоянное магнитное поле смещения, в котором находится аморфный ферромагнитный сердечник в режиме автопараметрического усиления, соответствует начальной области его технического насыщения, что снижает случайные флуктуации в материале сердечника.

Несмотря на то что сердечник м.м.д. с автопараметрическим усилением находится практически в области технического насыщения, стабильность его “нулевого” уровня уступает феррозондам. Поэтому такие м.м.д. целесообразно применять для измерения переменного магнитного поля. Основной причиной нестабильности сигналов частотой ниже 0.1 Гц является ненормированный дрейф источников опорного напряжения и амплитудных детекторов.

Автопараметрическое усиление сигнала магнитной индукции можно также получить в м.м.д. с сердечниками из нанокристаллических ферромагнитных сплавов, но в этом случае необходимо значительно увеличить амплитуду возбуждения и магнитное поле смещения. Поэтому в м.м.д. с автопараметрическим усилением целесообразно использовать аморфные ферромагнитные сплавы с компенсированной продольной магнитострикцией, которые имеют минимальную индукцию насыщения.

Косвенная оценка порога чувствительности м.м.д. была выполнена путем длительного накопления слабых сигналов магнитного поля на фоне геомагнитного шума в спокойном геомагнитном поле вдали от источников техногенных помех. На полученных оцифрованных и записанных на компьютер данных после дискретного преобразования Фурье надежно выделялись сигналы магнитной индукции, имеющие амплитуду менее 1 пТл. После преобразования Фурье мы имеем среднюю амплитуду геомагнитного шума всей записи, получаемую из суммы мгновенных значений амплитуды магнитного шума на каждой частоте, деленную на

число отсчетов примененного аналого-цифрового преобразователя AD7734 с временем дискретизации  $\sim 2$  мс.

На рис. 1 показано распределение средней амплитуды магнитного шума горизонтальной компоненты  $B_x$ , направленной по магнитному меридиану, в зависимости от частоты. Эти записи с различной продолжительностью были сделаны в спокойном геомагнитном поле на большом удалении от источников техногенных помех.

Порог чувствительности м.м.д. можно оценить, если сравнить среднюю амплитуду магнитного шума различной длительности при записи выбранной компоненты магнитной индукции в спокойном геомагнитном поле вдали от источников техногенных помех. Если распределение амплитуды измеряемой компоненты геомагнитного поля по частоте имеет плавный характер (с монотонным снижением амплитуды при росте частоты и без явных вариаций и выбросов амплитуды), то такое распределение амплитуды примерно соответствует случайному, некоррелированному геомагнитному шуму. В этом случае отношение средних амплитуд записей геомагнитного шума должно быть примерно равно корню квадратному от обратного отношения времени записи. Например, для записей на рис. 1 при случайном геомагнитном шуме и пренебрежимо малом собственном шуме м.м.д. на каждой фиксированной частоте должно выполняться соотношение:  $B_x(a)/B_x(b) \approx 10$ .

Полагая, что собственный магнитный шум м.м.д. остается постоянным, можно записать следующую систему уравнений для любой из выбранных частот:

$$\begin{cases} \sqrt{B_{geo}^2 + B_{MMS}^2} = B_1; \\ \sqrt{n^{-2} B_{geo}^2 + B_{MMS}^2} = B_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $B_{geo}$  — шум геомагнитного поля в короткой записи;  $B_{MMS}$  — шум м.м.д.;  $B_1, B_2$  — средние амплитуды измеренного магнитного шума соответ-

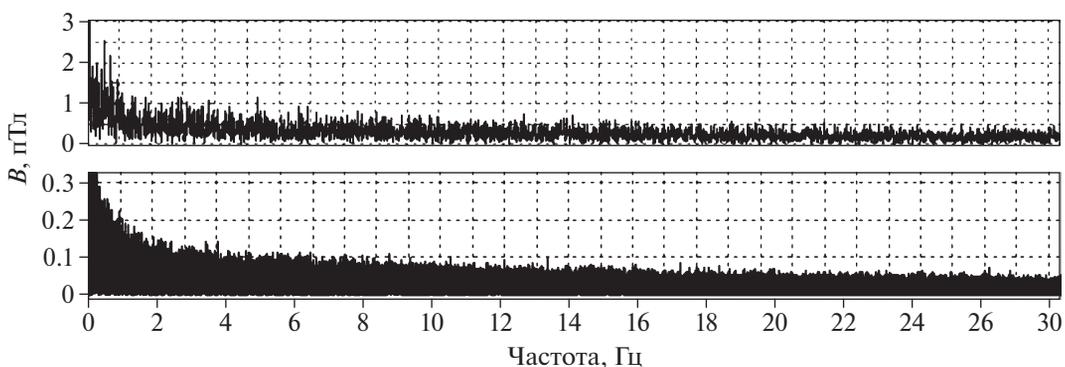
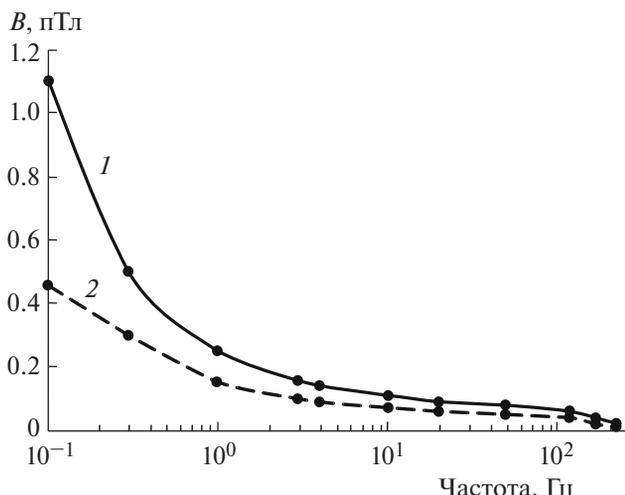


Рис. 1. Средняя амплитуда магнитного шума, регистрируемая м.м.д. в полосе частот от 0.01 до 30 Гц при продолжительности записи 100 с (а) и 10000 с (б).



**Рис. 2.** Средняя амплитуда горизонтальной составляющей магнитного шума, регистрируемого м.м.д. в спокойном геомагнитном поле (кривая 1), и амплитуда магнитного шума м.м.д., рассчитанная по формулам (1) при десятикратном соотношении времен записи (кривая 2).

ственно в короткой и длинной записях;  $n$  — отношение времен длинной и короткой записей.

Если подставить измеренные средние амплитуды шума  $B_1$  и  $B_2$  на выбранной частоте и решить систему уравнений (1), то можно приближенно определить амплитуду собственного шума м.м.д. на этой частоте.

На рис. 2 представлены зависимости от частоты средней амплитуды вертикальной составляющей геомагнитного шума  $B_z$  для записи продолжительностью 2.4 ч в спокойном геомагнитном поле в полосе пропускания 0.01–230 Гц (кривая 1), а также вычисленной амплитуды магнитного шума м.м.д. (кривая 2).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Определенный прогресс в улучшении параметров феррозондов с ортогональным возбуждением был достигнут при применении вспомогательного постоянного магнитного поля смещения. Дальнейшее небольшое снижение порога чувствительности таких феррозондов было получено параллельным соединением нескольких датчиков, что позволило получить порог чувствительности  $\sim 1$  пТл/Гц<sup>1/2</sup>. Как было показано в [8], основной вклад в шумы феррозондов с ортогональным возбуждением вносит аморфный ферромагнитный сердечник. Поэтому дальнейшее совершенствование феррозондов этого типа может быть связано с технологией изготовления и обработки аморфного ферромагнитного сплава, из которого делают сердечники.

Что касается м.м.д. с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции в аморфном ферромагнитном сердечнике, то его потенциальные возможности полностью не определены. Магнитомодуляционные датчики применялись в геофизике при работе в неэкранированном пространстве и имели порог чувствительности ниже уровня геомагнитного шума в спокойном геомагнитном поле, поэтому проблема улучшения их технических характеристик ранее не возникала.

Потенциально хорошие технические характеристики м.м.д. с автопараметрическим усилением обусловлены следующими факторами:

- магнитное поле смещения и магнитное поле возбуждения направлены вдоль оси легкого намагничивания аморфной ферромагнитной ленты;
- автопараметрический резонанс в ленте аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией позволяет получить коэффициент преобразования до 10 мВ/нТл;
- возбуждение аморфной ферромагнитной ленты осуществляется слабым гармоническим магнитным полем при отсутствии резких изменений намагниченности сердечника, что исключает шумы, появляющиеся в результате эффективного магнитоупругого взаимодействия в лентах аморфных ферромагнитных сплавов;
- рабочая точка аморфного ферромагнитного сердечника находится в начальной области его технического насыщения, что снижает вероятность флуктуаций намагниченности и, тем самым, уменьшает уровень собственного магнитного шума.

Из графика на рис. 2 следует, что вычисленная по формуле (1) средняя амплитуда магнитного шума м.м.д. может составлять  $\sim 0.45$  пТл на частоте 0.1 Гц и менее 0.1 пТл на частотах  $> 3$  Гц. На частотах  $> 20$  Гц вычисленная амплитуда шума и измеренная при длительности записи более 2 ч очень близки, а на частотах более 100 Гц практически совпадают. Резкое увеличение магнитного шума на частотах ниже 1 Гц может быть связано с повышенной статистической погрешностью при недостаточном числе периодов усредняемых сигналов самых низких частот. Кроме того, амплитуда геомагнитного шума в области частот ниже 1 Гц менее стабильна, чем на более высоких частотах.

Для получения предельно низкого порога чувствительности м.м.д. с автопараметрическим усилением необходимо иметь высокую стабильность и малые собственные шумы источника опорного напряжения, который задает рабочую точку датчика и поддерживает величину постоянного магнитного поля смещения. Кроме того, необходимо обеспечить высокую стабильность амплитуды генератора возбуждения и коэффициента передачи амплитудного детектора.

В электрических схемах м.м.д. используется амплитудный детектор. Однако в области автопараметрического резонанса наблюдается сильное изменение фазы колебаний модулирующей частоты, что в принципе позволяет получить более высокий коэффициент преобразования при использовании фазового детектирования сигнала магнитной индукции.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аморфные ферромагнитные сплавы с компенсированной продольной магнитострикцией, полученные методом быстрой закалки из расплава, остаются наиболее перспективными материалами для создания активных датчиков слабого магнитного поля, работающих при комнатной температуре.

Создание условий, при которых аморфный ферромагнитный сердечник постоянно находится вблизи области технического насыщения, а также минимизация шума, связанного с магнитоупругим взаимодействием в аморфных ферромагнетиках, полученных методом быстрой закалки из расплава, позволяют получить порог чувствительности, близкий к порогу чувствительности СКВИДов в диапазоне низких частот. Это дает возможность использовать модифицированные феррозонды с ортогональным возбуждением и

м.м.д. не только в геофизических исследованиях, но и в других областях науки и техники, в том числе, при измерениях в магнитоэкранированном пространстве.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sasada I., Kashima H.* // Journal of the magnetism society of Japan. January 2009. V. 33(2). P. 43. <https://doi.org/10.3379/msjmag.0901RF7129>
2. *Sasada I.* // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. V. 25 (10). P. 99. <https://doi.org/10.1109/INTMAG.2018.8508469>
3. *Bazinet R., Jacas A., Badini-Confalonieri G.A., Vazquez M.* // IEEE Trans. on Magnetics. 2014. V. 50 (5). P. 1. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2292834>
4. *Janosek M., Butta M., Dressler M., Saunderson E., Novotny D., Fourie C.* // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2020. V. 69 (5). P. 2552. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2949205>
5. *Сокол-Кутыловский О.Л.* // Измерительная техника. 2016. № 2. С. 46. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0937-x>
6. *Sokol-Kutylovskij O.L.* // Sensors and Actuators: A. Physical. 1997. V. 62/1–3. P. 496.
7. *Сокол-Кутыловский О.Л.* // ПТЭ. 2019. № 4. С. 101. <https://doi.org/10.1134/S0032816219040153>
8. *Butta M., Sasada I.* // IEEE Transactions on Magnetics. 2012. V. 48(4). P. 1508. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2173177>