

МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СЛАБОГО ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2019 г. О. Л. Сокол-Кутыловский

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

Поступила в редакцию 20.12.2018 г.

После доработки 20.12.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Описан магнитомодуляционный преобразователь слабого магнитного поля с сердечником из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией. Преобразователь работает в режиме автопараметрического усиления сигнала магнитной индукции. Диапазон частот измеряемого магнитного поля 0.1–240 Гц, динамический диапазон 120 нТл от пика до пика. Порог чувствительности преобразователя ниже минимального уровня геомагнитного шума, что позволяет при накоплении повторяющегося сигнала в неэкранированном пространстве приблизиться к порогу чувствительности сверхпроводящих магнитометров.

DOI: 10.1134/S0032816219040153

ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия магнитомодуляционного преобразователя (м.м.п.) с аморфным ферромагнитным сердечником (а.ф.с.), работающего в режиме автопараметрического усиления на основной частоте модуляции, ранее был описан в работе [1]. Из других публикаций наиболее близким техническим решением является дифференциальный магнитометр, работающий на основной частоте модуляции, в котором аморфные ферромагнитные сердечники вместе с вспомогательными магнитными полями смещения были включены встречно [2]. Несмотря на заявленную потенциально высокую чувствительность этого дифференциального магнитометра, дальнейшие работы по его совершенствованию не получили продолжения из-за сложности в настройке и низкого коэффициента преобразования.

Работа м.м.п. в режиме автопараметрического усиления сигнала магнитной индукции позволяет увеличить коэффициент преобразования в десятки раз по сравнению с обычным релаксационным режимом возбуждения аморфного ферромагнитного сердечника. Это важно, но не единственное условие для достижения хороших технических характеристик м.м.п.

Другим необходимым условием является выбор аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией и его последующая термомагнитная обработка. Не все а.ф.с. одинаково хорошо работают в режиме авто-

параметрического усиления. Кроме того, сердечники могут отличаться уровнем собственного шума, обусловленного образовавшимися дефектами в процессе быстрой закалки ферромагнитной ленты при ее получении из расплава. Поэтому при изготовлении м.м.п. требуется предварительный индивидуальный отбор а.ф.с., а в многоканальных м.м.п. — дополнительный подбор сердечников с максимально близкими параметрами.

Еще одним условием получения необходимых технических характеристик м.м.п. является минимизация дрейфа и электронных шумов источников опорного напряжения и генератора возбуждения, поскольку амплитуда этих дрейфов и шумов с частотами, входящими в полосу пропускания, прямо входит в спектр выходного сигнала м.м.п.

Трехкомпонентные м.м.п. с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции несколько лет использовались в геофизических исследованиях для измерения амплитуды геомагнитного шума низких частот [3]. Однако они могут быть применены и для решения ряда других научно-технических задач, где необходимо измерение очень слабого магнитного поля, особенно при сложной негармонической форме измеряемых сигналов, например при биомагнитных исследованиях в неэкранированном пространстве. Так же как и СКВИД-магнитометры, м.м.п. являются векторными магнитометрами. Они измеряют составляющую вектора магнитной индукции B_x , совпадающую с продольной осью ферромаг-

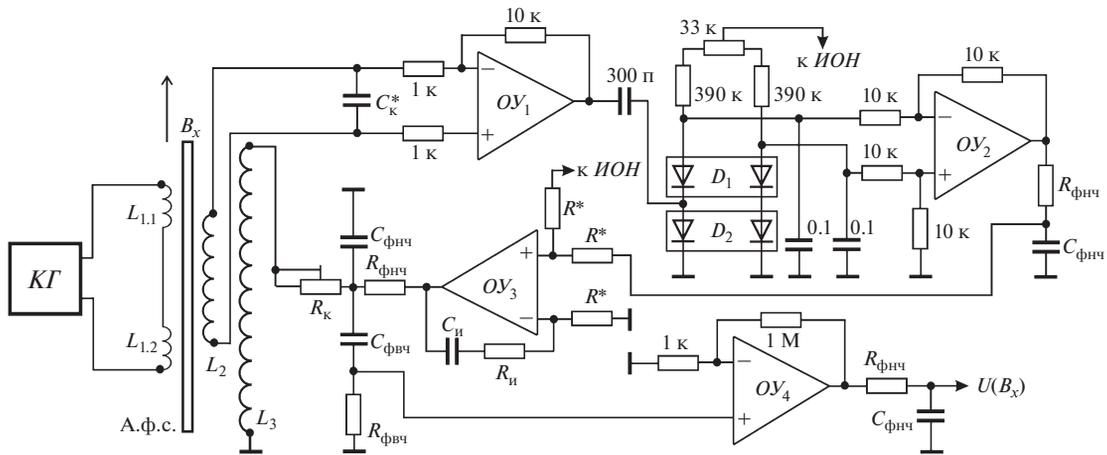


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема одного канала м.м.п. *КГ* – кварцевый генератор; *ИОН* – источник опорного напряжения; *OY₁–OY₄* – операционные усилители; *B_x* – измеряемая компонента магнитной индукции; *U(B_x)* – выходной сигнал, пропорциональный измеряемой компоненте магнитной индукции.

нитного сердечника, а не $\partial B/\partial t$, как индукционные датчики.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА М.М.П.

На рис. 1 представлена электрическая схема одного канала м.м.п., предназначенного для измерения слабого переменного магнитного поля. Он состоит из высокостабильного кварцевого генератора *КГ* с автоматической регулировкой амплитуды, выносного датчика, содержащего а.ф.с. с катушками возбуждения $L_{1.1}$ и $L_{1.2}$, приемной катушки L_2 и катушки обратной связи по магнитному полю L_3 .

Катушки возбуждения, соединенные с выходом *КГ*, модулируют магнитный поток в а.ф.с. слабым магнитным полем высокой частоты. Приемная катушка L_2 с а.ф.с. и конденсатор C_k^* образуют автопараметрический колебательный контур, настроенный на частоту *КГ*. Сигнал высокой частоты, снимаемый с автопараметрического колебательного контура и содержащий в себе усиленный сигнал внешнего магнитного поля низких частот, подается на дифференциальный усилитель, выполненный на операционном усилителе *OY₁*, после чего демодулируется амплитудным детектором. Амплитудный детектор состоит из резистивно-диодного моста, выполненного на прецизионных резисторах номиналом 390 кОм и диодных сборках D_1 , D_2 . Резистивно-диодный мост запитан по постоянному току от источника опорного напряжения *ИОН* через переменный балансировочный резистор. Выходное детектированное напряжение с диагонали резистивно-диодного моста поступает на вход дифференциального усилителя *OY₂* и, далее, на фильтр верхних частот *ФВЧ* ($R_{фвч}C_{фвч}$), который обрезает постоянную составляющую выходного напряжения пропорционально-интегрирующего регулятора и частоты ниже 0.01 Гц. Прошедший через *ФВЧ* сигнал частотой от 0.01 Гц до верхней частоты полосы пропускания (которая в данном случае равна 240 Гц, но, при необходимости, может быть повышена до нескольких кГц) усиливается в ~ 1000 раз при помощи неинвертирующего усилителя напряжения, выполненного на *OY₄*, и через *ФНЧ* поступает на выход м.м.п.

ных сборок применены специально подобранные по параметрам идентичные сборки КДС-532А.

Настройка амплитудного детектора сводится к установке нуля на выходе *OY* при помощи балансировочного резистора в отсутствие сигнала на входе при включенном питании детектора и *ИОН*. В качестве *ИОН* была применена микросхема ЛТС6655-2.5 в типовом включении, которая дает на выходе напряжение 2.5 В с нормированной амплитудой шума ≤ 625 нВ (от пика до пика) в полосе частот 0.1–10 Гц и температурный дрейф менее $2 \cdot 10^{-6}$ градус $^{-1}$.

Постоянная составляющая демодулированного сигнала подается на сигнальный вход пропорционально-интегрирующего регулятора, выполненного на *OY₃*. На опорный вход этого регулятора от *ИОН* подается опорное напряжение, соответствующее установленному магнитному полю смещения в выбранной рабочей точке м.м.п. Пропорционально-интегрирующий регулятор, соединенный через резистор R_k с катушкой обратной связи по магнитному полю L_3 , постоянно поддерживает в датчике м.м.п. установленное магнитное поле смещения, а сигнал отклонения от этого поля подается на фильтр верхних частот *ФВЧ* ($R_{фвч}C_{фвч}$), который обрезает постоянную составляющую выходного напряжения пропорционально-интегрирующего регулятора и частоты ниже 0.01 Гц. Прошедший через *ФВЧ* сигнал частотой от 0.01 Гц до верхней частоты полосы пропускания (которая в данном случае равна 240 Гц, но, при необходимости, может быть повышена до нескольких кГц) усиливается в ~ 1000 раз при помощи неинвертирующего усилителя напряжения, выполненного на *OY₄*, и через *ФНЧ* поступает на выход м.м.п.

Постоянная времени пропорционально-интегрирующего регулятора устанавливается резистором $R_{и}$ и конденсатором $C_{и}$: $t \sim 2\pi(R_{и}C_{и})$. ФНЧ ($R_{фнч}C_{фнч}$), использованные в схеме на рис. 1, служат для подавления остаточного сигнала модуляции высокой частоты. Конденсатор $C_{фвч}$ должен иметь малую утечку (в приборе был применен конденсатор типа К73-16В емкостью 22 мкФ). Питание м.м.п., за исключением $OУ_3$ и $OУ_4$, осуществляется стабилизированным напряжением ± 5 В. Для повышения коэффициента преобразования и согласования с аналого-цифровым преобразователем AD7734 напряжение питания $OУ_3$ и $OУ_4$ равно ± 12 В.

Сердечник выполнен из ленты аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией базового состава $Fe_5Co_{70}Si_{15}B_{10}$, полученной методом быстрой заковки из расплава. Размеры аморфной ферромагнитной ленты: толщина ~ 0.02 мм, ширина ~ 1 мм, длина 30–40 мм. Катушки возбуждения $L_{1,1}$ и $L_{1,2}$ конструктивно разнесены симметрично относительно приемной катушки L_2 параметрического колебательного LC-контура по краям каркаса а.ф.с. В этом случае сигнал возбуждения прямо не наводится в параметрическом LC-контуре, а проникает в него преимущественно через магнитный поток, проходящий через поперечное сечение а.ф.с. Катушка возбуждения содержит $2 \times 40 - 2 \times 80$ витков медного провода диаметром 0.1 мм, а катушка L_2 — от 200 до 600 витков медного провода диаметром 0.07 мм в зависимости от частоты модуляции. Катушка обратной связи L_3 , в каркас которой вставлена кварцевая трубка с а.ф.с. и намотанными на ней катушками $L_{1,1}$, $L_{1,2}$ и L_2 , может содержать до 500–800 витков медного провода диаметром 0.1–0.15 мм.

Настройка оптимального уровня автопараметрического усиления выполняется при отключенной катушке обратной связи с помощью небольшого постоянного магнита, расположенного около датчика. Поворотом магнита добиваются максимальной амплитуды модуляции на LC-контуре, что соответствует близкой к нулю составляющей магнитной индукции вдоль оси а.ф.с., а затем изменением положения магнита достигают уровня минимальной амплитуды модуляции на LC-контуре, соответствующего состоянию насыщения а.ф.с.

Максимальное значение амплитуды модуляции на LC-контуре должно превышать минимальный уровень хотя бы в 3–5 раз. Далее, магнитом устанавливают примерно средний уровень амплитуды модуляции на LC-контуре, после чего изменением (увеличением) емкости $C_{к}^*$ и вариацией магнитного поля магнита между крайними значениями амплитуды ищут резонансный пик

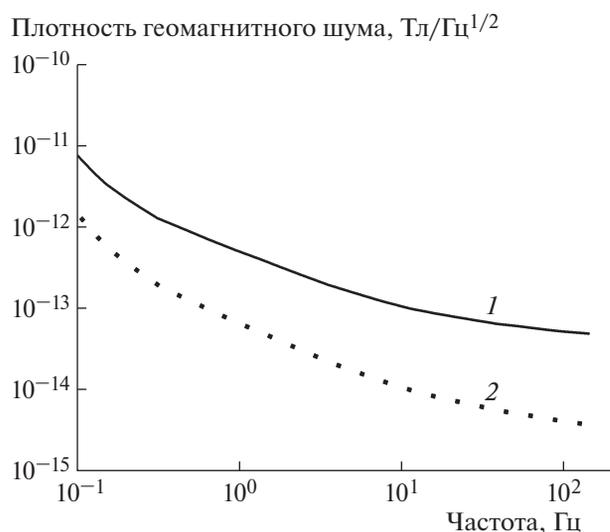


Рис. 2. Плотность вертикальной составляющей геомагнитного шума в диапазоне частот 0.1–240 Гц. 1 — время записи 100 с; 2 — время накопления сигнала в течение 2 ч.

амплитуды. При отсутствии явного резонанса необходимо в 1.5–2 раза увеличить амплитуду модуляции и повторить все действия еще раз. Амплитуда резонансного пика должна превышать максимальную нерезонансную амплитуду на LC-контуре примерно в 2–3 раза, при этом зависимость амплитуды от изменения внешнего магнитного поля должна быть плавной, без скачков и заметного гистерезиса.

После этого устанавливают уровень амплитуды на спадающей ветви резонанса чуть меньшим, чем максимальная нерезонансная амплитуда на LC-контуре, и измеряют соответствующее этому положению напряжение на выходе амплитудного детектора. С помощью резистивного делителя устанавливают такое же по величине напряжение, но противоположной полярности на опорном входе пропорционально-интегрирующего регулятора (неинвертирующий вход $OУ_3$, который идет к ИОН), после чего присоединяют катушку обратной связи. Захват рабочей точки м.м.п. осуществляется автоматически при кратковременном отключении отрицательного напряжения питания на $OУ_3$. Индикатором захвата рабочей точки может служить выходное напряжение на $OУ_3$, которое должно быть в пределах ± 10 В.

Коэффициент преобразования м.м.п. устанавливается подстройкой резистора $R_{к}$ и составляет 100–150 мВ/нТл (с учетом коэффициента усиления $OУ_4$). При работе м.м.п. в стационарных условиях, без поворотов блока датчиков относительно магнитного поля Земли, коэффициент преобразования может быть увеличен в 3–5 раз. В качестве $OУ_1 - OУ_4$ могут быть применены малошумящие преци-

зионные усилители, например ОР37, ОР27 и им подобные.

В многоканальном м.м.п., как правило, применяется один общий генератор возбуждения с буферными повторителями напряжения на каждый канал измерения. При значительном расширении полосы частот измерения м.м.п. может быть применена более высокая частота модуляции, вплоть до 5–10 МГц. На более высоких частотах эффективность параметрического усиления в а.ф.с. резко падает.

На рис. 2 показана зависимость плотности геомагнитного шума от частоты, полученная при помощи м.м.п. в спокойном геомагнитном поле вдали от источников техногенных помех.

Примерно такой же уровень плотности геомагнитного шума, как на рис. 2 (кривая 1), был получен в спокойном геомагнитном поле при минимальном уровне его микропульсаций с помощью низкотемпературного СКВИД-магнитометра [4] при аналогичной нижней частоте полосы пропускания (0.01 Гц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трехкомпонентный м.м.п., выполненный по приведенной выше схеме, при частоте модуляции 550 кГц и коэффициенте преобразования 150 мВ/нТл в диапазоне частот 0.1–240 Гц имел плоскую амплитудно-частотную характеристику и регистри-

ровал магнитное поле амплитудой менее 10 пТл при нижней частоте полосы пропускания 0.01 Гц, а в режиме накопления сигнала – менее 0.1 пТл на частотах выше 1 Гц. Динамический диапазон измерений при этом был ~120 нТл (от пика до пика). При питании м.м.п. от аккумулятора с напряжением 12 В потребляемый ток не превышал 0.1 А. Магнитомодуляционный преобразователь надежно работает при температуре окружающей среды 240–320 К. Однокомпонентный м.м.п. описанного выше типа с полосой частот пропускания до 1 кГц был успешно опробован в аппаратурно-программном комплексе, разработанном для поиска сульфидных месторождений по фазовому параметру с накоплением сигнала и GPS-синхронизацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sokol-Kutylovskij O.L.* // Sensors and Actuators A: Physical. 1997. V. 62. Issue 1–3. P. 496.
2. *Sonoda T., Ueda R., Ikemoto H., Kudo K., Kajiwara K.* // IEEE Transactions on Magnetics. 1989. V. 25. № 5. P. 3396.
3. *Sokol-Kutylovskii O.L.* // Measurement Techniques. 2018. V. 60. Issue 11. P. 1137. doi 10.1007/s11018-018-1130-8
4. *Ko H.W., Giannini J.A., Herchenroeder P.J.* // Johns Hopkins APL Technical Digest. 1982. V. 3. № 1. P. 59. http://techdigest.jhuapl.edu/views/pdfs/V03_N1_1982/V3_N1_1982_Ko.pdf