

УДК 621.317.444

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАГНИТОМЕТР

Р.В.Петров, В.С.Леонтьев

MAGNETOELECTRIC MAGNETOMETER

R.V.Petrov, V.S.Leont'ev

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Roman.Petrov@novsu.ru

Рассмотрен новый тип прибора для измерения переменного и постоянного магнитного поля на основе датчика, использующего магнитоэлектрический эффект. Магнитоэлектрический магнитометр обладает удовлетворительными характеристиками по чувствительности, на уровне 400 мВ/мТл, и прогнозируется дальнейшее улучшение чувствительности до уровня 5 В/мТл. По сравнению с гальваномангнитными магнитометрами разработанный тип магнитометра обеспечивает лучшие показатели чувствительности, термостабильности, линейности и радиационной стойкости.

Ключевые слова: *магнитоэлектрики, магнитометры, измерение магнитных полей*

In this paper a new type of devices for measurement of AC and DC magnetic field constructed on the basis of a sensor using magnetoelectric effect is proposed. Magnetoelectric magnetometer has good characteristics of sensitivity being 400 mV/mT and this allows to predict further improvement in sensitivity up to 5 V/mT. Compared with galvanomagnetic magnetometers, the designed type of magnetometers provides better sensitivity indexes, thermal stability, linearity, and radiation resistance.

Keywords: *magnetoelectrics, magnetometers, magnetic-field measurement*

Введение

Магнитометры находят широкое применение в различных областях науки и техники. В физике они применяются для измерения магнитного поля, в геологии — для поиска полезных ископаемых, в археологии — при археологических раскопках, в астрофизике — для исследования орбит планет, в биологии и медицине — для изучения живых существ, применяются также в сейсмологии, для навигации на море, для изучения космоса, в авиации и т.д. Для измерения индукции магнитного поля, а также величин, связанных с магнитным полем, например, потока магнитного поля через заданную поверхность, применяют магнитометры, основанные на магнитодиодном эффекте, гальваномагнитных явлениях (эффекте Холла), катушках Гельмгольца, магниторезистивном эффекте и др. Магнитоэлектрические (МЭ) магнитометры могут найти применение в медицинской технике в качестве измерителей магнитных полей человека и живых существ для измерения магнитобиологических реакций, электрических сигналов сердца, поиска ферромагнитных включений, сигналов скелетных мышц, глаз, фоновой и вызванной активности мозга, клетчатки глаза, также возможно применение МЭ датчиков для магнитной томографии. В охранных системах они могут использоваться как датчики движения, в металлоискателях, в системах АБС автомобилей, в системах управления двигателем, в робототехнике — для контроля угловых и линейных перемещений, в измерительной технике — для производства приборов для измерения характеристик магнитного поля и магнитных свойств материалов. Сенсоры на магнитоэлектрических материалах предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока и фиксируют наличие переменного электромагнитного поля и постоянного магнитного поля [1-4]. Применение магнитоэлектрического эффекта для измерения магнитных полей и построения магнитометра было описано ранее в статье [5].

Целью данной статьи является описание конструкции и структурной схемы магнитометра предназначенного для измерения как постоянного, так и переменного магнитного поля, сравнение основных характеристик магнитоэлектрического и Холловского магнитометров.

Конструкция

магнитоэлектрического магнитометра

Конструкция МЭ датчика подробно обсуждалась в [4]. Датчик на магнитоэлектрическом элементе позволяет достичь чувствительности к магнитному полю более чем 5 В/мТл. Для создания датчика для МЭ магнитометра был использован МЭ элемент, состоящий из пьезоэлектрика ЦТС-19 с размером $10 \times 1 \times 0,25$ мм и двух обкладок метгласа соответствующего размера. Чувствительность датчика составляла 400 мВ/мТл, характеристика приведена на рис.1. Для измерения постоянного магнитного поля применялся датчик, состоящий из установленного в центре соленоида МЭ элемента. Соленоид с размерами внешнего диаметра 6 мм и внутреннего диаметра 1,5 мм имел длину 10 мм. На соленоид подавалось переменное напряжение амплитудой 5 В и частотой 500 Гц.

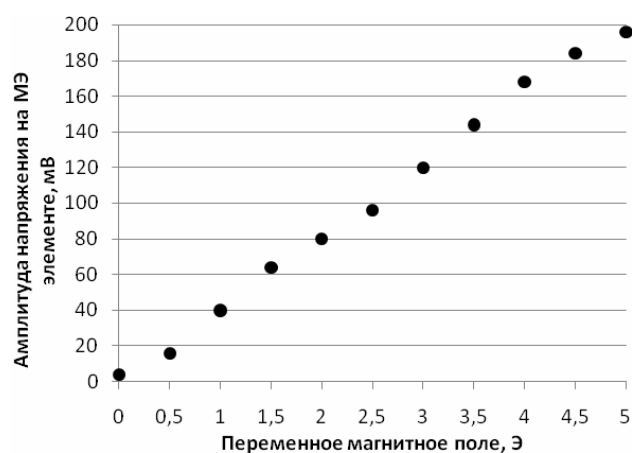


Рис.1. Характеристика МЭ элемента в переменном магнитном поле

Для дальнейшей обработки сигнала применялся усилитель, который обеспечивал усиление сигнала с датчика от 0 до 5 В, чтобы аналого-цифровой преобразователь (АЦП) затем работал в лучшем режиме. Выход АЦП соединен с микропроцессором, который управляет работой индикации. Структурная схема МЭ магнитометра приведена на рис.2.

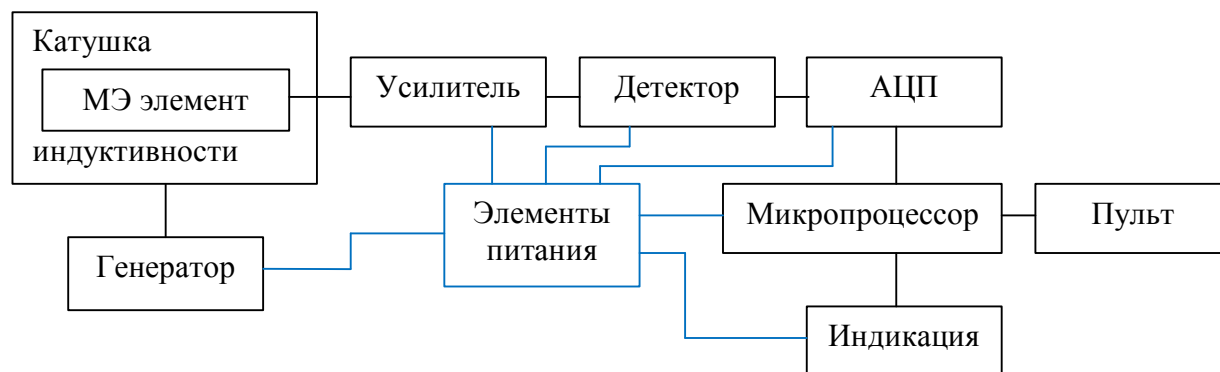


Рис.2. Структурная схема МЭ магнитометра



а)



б)

Рис.3. МЭ магнитометр

Разработанный МЭ магнитометр состоит из следующих узлов: МЭ элемента с катушкой индуктивности, усилителя, детектора, аналого-цифрового преобразователя, микропроцессора, индикатора, пульта управления, генератора и элемента питания. Электронная схема МЭ элемента, генератора, усилителя и детектора вынесена в отдельную измерительную штангу или пенал. Микропроцессор, АЦП, индикация и пульт расположены в корпусе прибора. Рис.3 иллюстрирует два варианта исполнения магнитометра. Первый вариант (рис.3а) — с использованием гибкой выносной штанги, второй вариант (рис.3б) — с использованием пенала. Цена шкалы магнитометра определена из типа примененного АЦП и индикатора и составила 5 мЭ. Погрешность при измерениях не более 1%.

Сравнительные характеристики магнитометров

Проведем сравнение между характеристиками магнитоэлектрического магнитометра и магнитометра на эффекте Холла. Эффект Холла заключается в следующем: в пластине, вдоль которой протекает ток, во внешнем магнитном поле, вектор которого направлен нормально к плоскости пластины, возникает поперечное электрическое поле. Основным источником погрешности при абсолютном измерении магнитного поля датчиком Холла является остаточное напряжение, возникающее на потенциальных контактах [6]. Например, для датчика типа ПХЭ 606117А остаточное напряжение составляет 48 мкВ, что соответствует погрешности по магнитному полю приблизительно 0,1 мТл. При этом остаточное напряжение обладает существенной температурной зависимостью. Это обстоятельство является одним из недостатков. Современные образцы датчиков Холла обладают магнитной чувствительностью по-

рядка 100 мВ/Тл, нелинейностью характеристики преобразования до 1%, широким диапазоном рабочих температур (от 1,5 до 300 К), полосой рабочих частот до 103 Гц, малыми размерами. В области низких частот у датчика Холла не наблюдается значительного роста фликкер-шума, что позволяет использовать его при измерении постоянных и медленно меняющихся магнитных полей. Датчики Холла не имеют хороших параметров радиационной стойкости, что ограничивает их применение в космических системах.

Магнитоэлектрический эффект — это индуцирование магнитным полем электрической поляризации, либо индуцирование электрическим полем намагниченности. Магнитоэлектрические датчики могут иметь ряд преимуществ перед датчиками, использующими другие эффекты. Например, чувствительность таких датчиков может быть сравнимо выше, чем, например, датчиков Холла [7,8], и приближается к сверхчувствительным SQUID сенсорам — 10^{-9} Гс. Таким образом, изучение и разработка магнитометров на магнитоэлектрическом эффекте является актуальной задачей, и разработка подобного прибора значительно улучшит точность производимых промышленностью приборов. Как уже отмечалось, современные датчики магнитного поля на основе эффекта Холла обладают рядом недостатков, как то: нелинейность в сильных магнитных полях, узкий динамический диапазон, ограниченный диапазон рабочих температур, необходимость подачи питающего напряжения путем использования полупроводниковых материалов, наличие остаточных напряжений, низкая стойкость к статическому электричеству и радиоактивным излучениям. Указанных недостатков практически лишены датчики на МЭ эффекте, кроме того, они технологичны и легко ос-

ваиваются даже небольшими производственными предприятиями, что позволит в дальнейшем применять множество конструктивных решений. Особо стоит отметить их стойкость к значительному уровню радиоактивного излучения, что дает возможность использования МЭ датчиков для космических аппаратов. Температурный диапазон от 0°C до температуры Кюри используемых составляющих композиционного МЭ материала (например, до 290°C в ЦТС-19 и до 670°C — в высокотемпературной керамике). МЭ датчики магнитного поля занимают нишу между сверхчувствительными СКВИД-системами (приближаясь к ним по показателям чувствительности, но существенно превосходя по ценовым показателям) и датчиками Холла (вплотную приближаясь к ним по ценовым характеристикам, но существенно превосходя по показателям чувствительности). На данный момент получены экспериментальные данные в низкочастотной области и области электромагнитического резонанса для композитов, включающих манганиты, ферриты-шпинели, терфенол, пьезокерамику ЦТС. Разработанные на основе МЭ эффекта магнитометры обладают повышенной чувствительностью, высокой термостабильностью, минимальной потребляемой мощностью, широким диапазоном измеряемых магнитных полей.

Заключение

Разработан магнитометр на основе датчика, использующего МЭ эффект. МЭ магнитометр обладает удовлетворительными характеристиками по чувствительности, не хуже, чем у конкурентных образцов. По сравнению с гальваномагнитными магнитометрами разработанный тип магнитометра обеспечивает лучшие показатели термостабильности, линейности и радиационной стойкости.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы и исследовательского проекта РФФИ No. #13-02-98801.

1. Петров Р.В., Бичурин М.И., Килиба Ю.В. Датчики электромагнитного поля // Тез. докл. 8-й Всерос. науч.-техн. конф. «Датчики и преобразователи информации систем

измерения, контроля и управления». М.: МГИЭМ, 1996. Т.2. С.324.

2. Петров Р.В., Килиба Ю.В. Магнитоэлектрические датчики // XXI Гагаринские чтения: Тез. докл. Ч.3. М.: МГТУ, 1996. С.148.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V. et al. Magnetoelectric Sensor of Magnetic Field // *Ferroelectrics*. 2002. V.280. P.199.
4. Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики ЦТС и метгласа // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. №1. URL: www.science-education.ru/101-5367.
5. Soloviev I.N., Bichurin M.I., and Petrov R.V. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors // *PIERS Proceedings*. Moscow, Russia, 19-23 August 2012. P.1359-1362.
6. Игнат'ев В.К., Протопопов А.Г. Магнитометр на основе преобразователя Холла // ПТЭ. 2003. № 3. С.116-120.
7. Yaojin Wang, David Gray, David Berry, et al. An Extremely Low Equivalent Magnetic Noise Magnetoelectric Sensor // *Adv. Mater.* 2011. V.23. P.4111-4114. DOI: 10.1002/adma.201100773
8. Yaojin Wang, Menghui Li, Hasanyan D., et al. Geometry-induced magnetoelectric effect enhancement and noise floor reduction in Metglas/piezofiber sensors // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V.101. P.092905. [http://dx.doi.org/10.1063/1.4737906]

Bibliography (Transliterated)

1. Petrov R.V., Bichurin M.I., Kiliba Yu.V. Datchiki elektromagnitnogo polia // Tез. dokl. 8-i Vseros. nauch.-tekhn. konf. «Datchiki i preobrazovateli informatsii sistem izmerenii, kontroliia i upravleniia». M.: MGIEM, 1996. T.2. S.324.
2. Petrov R.V., Kiliba Yu.V. Magnitoelektricheskie datchiki // XXI Gagarinskie chteniia: Tез. dokl. Ch.3. M.: MGATU, 1996. S.148.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V. et al. Magnetoelectric Sensor of Magnetic Field // *Ferroelectrics*. 2002. V.280. P.199.
4. Bichurin M.I., Petrov R.V., Solov'ev I.N., Solov'ev A.N. Issledovanie magnitoelektricheskikh sensorov na osnove p'ezokeramiki TsTS i metglasa // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*. 2012. №1. URL: www.science-education.ru/101-5367.
5. Soloviev I.N., Bichurin M.I., and Petrov R.V. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors // *PIERS Proceedings*. Moscow, Russia, 19-23 August 2012. P.1359-1362.
6. Ignat'ev V.K., Protopopov A.G. Magnitometr na osnove preobrazovatel'ia Kholla // PTE. 2003. № 3. С.116-120.
7. Yaojin Wang, David Gray, David Berry, et al. An Extremely Low Equivalent Magnetic Noise Magnetoelectric Sensor // *Adv. Mater.* 2011. V.23. P.4111-4114. DOI: 10.1002/adma.201100773
8. Yaojin Wang, Menghui Li, Hasanyan D., et al. Geometry-induced magnetoelectric effect enhancement and noise floor reduction in Metglas/piezofiber sensors // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V.101. P.092905. [http://dx.doi.org/10.1063/1.4737906]