ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МАГНИТОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ: РЕАЛИЗАЦИЯ И ПРОЕКТЫ**Любимов Владимир Валерьевич***Старший научный сотрудник**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн**им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, г.Москва, г.Троицк*[DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2018.3.57.31-36](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2018.3.57.31-36)**АННОТАЦИЯ**

Мониторинг окружающей среды при помощи специальных приборов позволяет исследователям точно знать о наличии естественных и искусственно создаваемых электромагнитных полей и позволяет понять степень их влияния на живой организм. Современные приборы на основе малогабаритных датчиков, могут работать в помещениях любого типа и размера, что позволяет проводить специальные исследования электромагнитной обстановки практически в любых условиях производственных, лечебных, и жилых помещений. Такие приборы на основе аморфных феррозондовых датчиков с высокой разрешающей способностью созданы в ИЗМИРАН. В работе представлены проекты малогабаритных магнитометров для исследования природных и техногенных электромагнитных полей.

ABSTRACT

Environmental monitoring with the help of special devices allows researchers to know exactly about the availability of natural and artificially generated electromagnetic fields and allows you to understand the degree of their influence on the living organism. Modern devices based on small sensors can operate in the premises of every type and size, that allows to conduct special studies of electromagnetic environment in almost any industrial, medical, and residential premises. Such devices based on amorphous fluxgate sensors with high-resolution created in IZMIRAN. The work presents the projects of small magnetometers to study natural and man-made electromagnetic fields.

Ключевые слова

Магнитное поле, диагностические магнитометры, феррозондовые датчики, электромагнитные поля, электромагнитные излучения, магнитометр-градиентометр

Keywords:

Magnetic field, diagnostic magnetometers, fluxgate sensors, electromagnetic fields, electromagnetic radiation, magnetic gradientometer

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс технологии, выразившийся в стремительном развитии микропроцессорной техники и в появлении довольно недорогих средств связи, телефонии и интернета, позволил успешно решить вопросы, связанные с доступностью информации персонально-массового характера, связанного, например, с проблемами экологии человека в местах его обитания [1, 2].

Влияние на человеческий организм, на его жизнедеятельность и трудоспособность, различного рода *биотропных* факторов, одним из которых являются, как известно, природные и техногенные электромагнитные поля (ЭМП) и электромагнитные излучения (ЭМИ), постоянно вызывают дискуссии в научных и медицинских кругах учёных [1]. Речь идёт о способах получения необходимой индивидуальной экспресс-информации мониторингового характера (с визуализацией результатов отдельных *всегда очень интересующих человека физических параметров окружающей его среды*) в реальном времени. Все эти способы подразумевают использование необходимых чувствительных датчиков совместно с цифровым накопителем информации или недорогих приборов и предполагают их применение как в условиях города, так и вне его, реализуя при этом возможность передачи данных по каналам связи.

Мониторинг окружающей среды при помощи специальных приборов, - диагностических магнитометров (ДМ), - позволяет исследователям точно знать о наличии естественных ЭМП и расположении вредных искусственно создаваемых ЭМИ, а также понять степень их влияния на живой организм. Современные приборы на основе малогабаритных датчиков, могут работать в помещениях любого типа и размера, что позволяет проводить специальные исследования электромагнитной обстановки (ЭМО) как в условиях обсерватории, так и в производственных, лечебных, и в жилых помещениях.

Ниже речь пойдёт о конструкции созданных в ИЗМИРАН магнитометрах с высокой (на уровне 1 нТл и выше) разрешающей способностью для исследования ЭМП, созданных на основе аморфных феррозондовых датчиков (ФД). Представлены проекты малогабаритных приборов для исследования природных и техногенных ЭМП и ЭМИ.

ФЕРРОЗОНДОВЫЕ ДАТЧИКИ

Феррозонд представляет первичный магнитомодуляционный преобразователь (ММП), используемый в качестве магнитометра для преобразования магнитной индукции в электрический сигнал. Действие феррозонда основано на модуляции магнитного состояния ферромагнитного сердечника с помощью вспомогательного переменного магнитного поля (МП) [3]. Феррозонд иногда называют

ферроимпульсным преобразователем, подчеркивая его принадлежность к магнитомодуляционным преобразователям ММП. Феррозонд (см. схему на *рис.1*) состоит из магнитопровода, обмотки возбуждения (питаемой переменным синусоидальным током частотой 1...300 кГц) и измерительной обмоткой.

Рис.1. Схема феррозонда и датчики различных производителей, созданные на основе сердечников из аморфного сплава: 1- датчики фирмы Speake & Co (Англия); 2 - датчик Ю.В. Афанасьева [**]; 3 - датчик СКБ ФП РАН (Россия); 4 – датчик фирмы Stefan Mayer Instruments (Германия).

Обмотка возбуждения наносится так, чтобы создавать одинаковые встречные переменные магнитные потоки в двух половинках магнитопровода. В отсутствие измеряемого постоянного (или медленно изменяющегося по сравнению с частотой возбуждения) МП, ЭДС на измерительной обмотке близка к нулю. В постоянном МП в ЭДС возникают четные гармоники, амплитуда которых пропорциональна проекции вектора напряженности измеряемого МП на магнитную ось сердечника и скорости изменения его дифференциальной магнитной проницаемости. Измерительный сигнал феррозонда появляется при изменении во времени магнитной проницаемости магнитопровода, при этом кривая намагничивания должна иметь нелинейный характер. Чувствительность феррозонда будет наибольшей, если колебания МП происходят в области, где материал магнитопровода имеет высокую дифференциальную магнитную проницаемость.

Магнитомодуляционные датчики на основе сердечников из аморфного сплава с компенсированной продольной магнитоотрицательностью, в отличие от феррозондов, работают на частной петле и намагничиваются слабым переменным МП гармонической формы. Аморфные ферромагнитные сплавы, получаемые методом быстрой закалки из расплава, помимо широкого применения в радиоэлектронике и электротехнике, являются наиболее перспективными материалами для высокоэффективных магнитных датчиков и преобразователей. Кроме того, эти магнитные материалы наиболее эффективны для применения в миниатюрных магнитомодуляционных датчиках слабого переменного МП в области частот от 0,03 Гц до 0,3 МГц, где с их помощью можно получить порог чувствительности 10-13, 10-14 Тл·Гц^{-1/2} [4, 5].

Феррозонды, которые показаны на *рис.1*, имеют сердечники (магнитопровод) выполненные в форме сплюснутого эллипса или вытянутого в од-

ном направлении овала, у которого имеются два параллельных прямолинейных участка в направлении большой оси («Рейс-трек»). Такой сердечник более технологичен в изготовлении и создаётся путём навивки тонкой пермаллоевой ленты на керамическое основание. Лазерная резка сердечника и лазерная обработка поверхности сердечника из магнитомягкого аморфного сплава для феррозондовых магнитометров позволяют улучшить технологию изготовления ФД и повысить их метрологические характеристики. Например, ФД указанный на *рис.1* цифрой 3, был изготовлен СКБ ФП РАН с применением аморфного пермаллового материала типа 82К3ХСР, разработанного в Институте Прецизионных Сплавов [6]. Сердечник этого ФД имел конструкцию «Рейс-трек» и был изготовлен из ленты толщиной 0,02 мм методом травления. Габаритные размеры ФД, - 48x24x12 мм.

МАГНИТОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ФД

В период с 2004 по 2008 гг. сотрудниками ИЗМИРАН на базе аморфных ФД было создано несколько различных моделей магнитометров [7-9] общий вид некоторых из них показан на фото на *рис.2*.

Магнитометр феррозондовый двухканальный IDL-12 является высокочувствительным мало-

габаритным компонентным магнитометром, предназначенным для одновременного измерения в реальном времени, регистрации и представления данных измерений вариаций двух (*любых*) составляющей вектора магнитной индукции (ВМИ) поля Земли, а также для исследования полей, создаваемых искусственными источниками. Магнитометр IDL-12 выполнен в виде лабораторного прибора (см. *рис.2*). Он включает в себя следующие основные функциональные узлы: блок измерения (БИ) размером 100 x 100 x 50 мм и два одинаковых магнитных измерительных преобразователя (МИП) размером 20 x 20 x 63 мм. Оба МИП соединены с БИ при помощи кабелей длиной 1,5...2 м. МИП выполнен на основе однокомпонентного аморфного ФД (конструкция ФД показана под номером 4 на *рис.1*), который имеет измерительный диапазон равный ± 100 мкТл. Цикл автоматических измерений прибора лежит в пределах от 0,1 до 60 с и устанавливается программно. Передача измеренных данных осуществляется в персональный компьютер (ПК) по последовательному протоколу RS-232. Магнитометр питается от источника постоянного тока напряжением 9...12 В, предусмотрена возможность питания прибора от сети переменного тока напряжением 220 В $\pm 10\%$, (50 Гц) при помощи стандартного сетевого адаптера (СА). Мощность потребления от источника постоянного тока не более 1,5 Вт. Общий вес прибора составляет 0,6 кг.

Рис.2. Феррозондовые магнитометры и градиентометры созданные на основе аморфных ФД.

Основное назначение прибора – проведение научных исследований при работе в магнитной камере или экранированном помещении. Магнитометр IDL-12 может использоваться в помещениях любого типа и размера, в условиях обсерватории, в полевых условиях и в качестве автономной станции. Прибор может использоваться для оценки интенсивности магнитной бури в реальном масштабе времени, может использоваться для контроля ЭМО лечебными учреждениями и медицинскими центрами диагностики, может быть использован для определения величины и местонахождения "вредных" электромагнитных возмущений искусственного происхождения, оказывающих воздействие на человека на его рабочем месте.

Магнитометр-градиентометр IGF-01 "GRADIMAG" был создан на основе двух одинаковых ФД конструкции Ю.В. Афанасьева (конструкция ФД показана под номером 2 на *рис.1*). Прибор предназначен для измерения линейного градиента МП в движении, для исследования его вариаций в статике, для исследования полей, создаваемых искусственными источниками, для систем, служащих для привязки и ориентации объектов по МП, для проведения поисковых и рекогносцировочных работ и для специальных целей. Прибор может быть использован на суше, на подвижной платформе, в полевых условиях и в качестве автономной стационарной вариационной станции. IGF-01 выполнен в виде переносного прибора (см. *рис.2*) и состоит из двух основных частей: блока датчиков (БД) и БИ, соединенных между собой при помощи кабеля длиной 1,5 м. IGF-01 является векторным прибором и имеет измерительный диапазон $0... \pm 20$ мкТл. При этом возможно масштабирование регистрации данных на графическом индикаторе в 2 и в 4 раза в сторону увеличения разрешающей способности. Отсчетная точность на цифровом дисплее составляет 1 нТл, при этом относительная погрешность измерений 0,1%. Максимальная скорость автоматических измерений 10 изм/с. Имеется возможность программного изменения цикла автоматических измерений. Объем энергонезависимой памяти для регистрации измеренных данных 1 Мбайт (позволяет проводить непрерывные измерения с циклом 0,1 с и накапливать данные в течение 8 часов). Передача накопленных данных осуществляется в ПК по последовательному протоколу (RS-232) со скоростью 9600 бод. Напряжение питания прибора от источника постоянного тока в пределах от 9 до 12 В. Предусмотрена возможность питания от сети переменного тока (напряжением 220 В, 50 Гц) при помощи стандартного СА. Мощность потребления от источника постоянного тока не более 0,6 Вт. Габаритные размеры и масса: БД - 105 x 47 x 17 мм (0,6 кг); БИ - 228 x 115/72 x 48 мм (0,4 кг).

Переносной магнитометр-градиентометр (ПМГ) модель GF-02 предназначен для исследования пространственного градиента МП в процессе проведения геофизических и научных исследований, а также для проведения поисковых работ. ПМГ измеряет линейный пространственный гради-

ент МП в заданном направлении в единицах магнитной индукции, отнесенных к величине «*измерительной базы*» (нТл/м). ПМГ может использоваться для измерения горизонтального градиента (ГГ) и вертикального градиента (ВГ) МП, его вариаций на одной измерительной точке в статике в течение продолжительного времени, а также может использоваться для проведения измерений ГГ и ВГ в движении в режиме реального времени. Прибор может быть использован в режиме «*магнитных весов*» для определения намагниченности различных материалов и минералов, для проведения испытаний на *немагнитность* различных предметов.

ПМГ состоит из двух основных функциональных узлов: БД и БИ, соединенных между собой кабелем длиной 1,5...2 м. Общий вид прибора показан на *рис.2*. БД включает в себя два однокомпонентных феррозондовых МИП *поле/частота* (конструкция ФД, - FGM-3, - показана под номером 1 на *рис.1*). Магнитные оси ФД каждого из МИП расположены на одной линии, а их центры отстоят друг от друга и жестко закреплены на расстоянии 1 м («*измерительная база*»). БИ выполнен на базе микропроцессора и оснащен памятью емкостью 2 Мб для хранения данных и программ, а также таймером и графическим индикатором. Встроенный последовательный интерфейс позволяет БИ обеспечивать передачу данных и обмен информацией с ПК на расстоянии до 5...25 м. Прибор имеет три измерительных диапазона: ± 1 , ± 10 и ± 100 мкТл. Отсчетная точность во всех измерительных диапазонах равна ± 1 нТл. Питание ПМГ осуществляется от аккумуляторной батареи постоянным током напряжением в пределах от 9 до 12 В или от батарейки типа 6F22. Масса прибора в походном варианте, - не более 1,2 кг.

Малогабаритный цифровой регистрирующий магнитометр MF-03-R модель «М» (см. *рис.2*) выполнен на основе однокомпонентного аморфного ФД (конструкция ФД показана под номером 4 на *рис.1*) в виде переносного прибора [8]. Он предназначен для измерения различных составляющих ВМИ поля Земли, а также для исследования полей, создаваемых искусственными источниками, для систем, служащих для привязки и ориентации объектов по МП и для специальных целей. Магнитометр может использоваться в геофизике на суше, на море, на подвижном носителе, в условиях обсерватории, в качестве автономной станции, в полевых условиях и для проведения поисковых и рекогносцировочных работ.

Магнитометр имеет два измерительных диапазона ± 20 и ± 100 мкТл, при этом цикл автоматических измерений во всех измерительных диапазонах равен 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 10; 20; 30 и 60 с. Измеренное значение магнитной индукции совместно с текущим временем измерений визуализируется на цифровом дисплее. Напряжение питания от источника постоянного тока в пределах от 2,7 до 3,3 В. Мощность потребления от источника постоянного тока в режиме измерения составляет 0,045 Вт. В режиме энергосбережения потребляемая мощность от источника питания не превышает 0,3 мВт. Объем

энергонезависимой памяти для регистрации измеренных данных 1 Мбайт, что позволяет проводить непрерывные измерения с циклом 0,25 с и накапливать данные в течение 34 часов. Вес всего комплекта прибора, уложенного в укладочный ящик, составляет не более 1,5 кг. Отличительной особенностью прибора является рекордное для магнитометров такого класса потребление энергии от источника питания и работа только от двух батареек типа АА. Встроенное АЦП позволяет организовать режим работы с фиксацией «базового значения поля», что позволяет использовать MF-03-RM как в режиме вариационной станции, так и в режиме измерения градиента МП.

ПРОЕКТЫ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭМИ

В практике изучения ЭМО необходимо различать приборы для профессиональных измерений ЭМП на производственных территориях (в интересах соответствующих служб контроля) и приборы для оценочных и экспресс-измерений ЭМП и ЭМИ, позволяющие быстро и более точно получать достаточно квалифицированную информацию, связанную с безопасностью человека.

Созданные в ИЗМИРАН современные диагностические магнитометры на основе малогабаритных аморфных ФД [9] позволяют использовать их для электромагнитных исследований в помещениях любого типа и размера. Появилась возможность проводить мониторинг и изучение ЭМО, проводить исследовательские работы в клиниках в условиях города и в обычных жилых и *гипомагнитных* помещениях [2], при относительно большом уровне промышленных и техногенных помех, где МП бывает сильно аномальным.

Наряду с созданными реальными приборами было создано несколько проектов (и исследовательских макетов) перспективных приборов которые предназначены для исследования ЭМИ и ЭМП, о которых речь пойдет ниже.

Индикатор электромагнитной обстановки предназначен для проведения электромагнитных исследований. Он представляет собой малогабаритный носимый прибор со встроенным ФД и цифровым индикатором, позволяющим определять источники ЭМИ искусственного происхождения, которые оказывают воздействие на человека на его рабочем месте, в том числе и на транспорте. При помощи такого прибора возможно осуществление контроля ЭМО, например, в электронной промышленности, в локальных и *гипомагнитных* помещениях [2]. Диапазоны измерения МП: $\pm 0,2$, ± 2 , ± 20 и ± 200 мкТл а цена единицы счета младшего разряда цифрового табло соответственно: 0,1, 1, 10, и 100 нТл. Напряжение постоянного тока на аналоговом выходе $0... \pm 3$ В. Напряжение питания от источника постоянного тока 9 В, а потребляемая прибором мощность, не более 0,1 Вт. Габаритные размеры прибора - 150 x 40 x 20 мм, масса не более 0,3 кг.

Индикатор электромагнитной обстановки IDL-08 (проект). Этот прибор планируется создать

для использования в службах санэпидемстанций. IDL-08 представляет собой малогабаритный носимый прибор со встроенными ФД на базе FGM-2 (конструкция FGM-2 показана под номером 1 на *рис.1*), и графическим индикатором, что позволит визуализировать результаты исследования ЭМО, например, в локальном помещении в виде построения магнитных карт и трехмерных проекций измеренного МП моментально, в процессе или по окончании проведения исследований. Прибор использует оригинальные программы-фильтраторы, позволяющие проводить работы в условиях с большим уровнем техногенных шумов и помех. Планируемые основные технические характеристики прибора следующие: два измерительных диапазона МП ± 20 и ± 200 мкТл, отсчётная точность по цифровому дисплею соответственно 10, и 100 нТл, напряжение питания от источника постоянного тока в пределах от 2,7 до 3,3 В и потребляемая мощность, не более 0,2 Вт. Габаритные размеры прибора - 200 x 100 x 30 мм, масса не более 0,5 кг.

Регистратор магнитной активности (РМА) (проект). Этот прибор должен быть малогабаритным, автономным и недорогим. Его назначение, - непрерывное накопление, хранение и передача данных об окружающей ЭМО в условиях локального помещения. Регистрация МП производится со скоростью одно значение в минуту. Для трансляции данных используются способы и системы современной передачи данных на основе мобильных передатчиков или телефонов. Емкость энергонезависимой памяти должна сохранять накопленные данные в течение 5...7 дней. Для приема данных от РМА используется канал связи, который подключается к ПК. При включении ПК осуществляется передача данных от РМА без вмешательства пользователя, а на дисплее ПК выводится в реальном времени сообщение об ЭМО в месте установки датчика. Возможно использование нескольких датчиков МП, расположенных в различных помещениях (в углах или по периметру помещений) и использование носимого приемника (считывателя) цифровой информации. В зависимости от размера исследуемого помещения и мониторинговых задач, РМА может включать от одного до 10 и более МЧД. Встроенный анализатор изменения МП и цифровой фильтр позволят на базе РМА реализовать адаптивный режим измерения, режим включения звуковой и световой индикации при быстром изменении поля или его градиента, например, когда прибор используется в качестве охранного устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в институте ведется активная инициативная работа по созданию ДМ и накопителей информации нового поколения для использования их как в медицинских учреждениях, так и для индивидуального пользования, позволяющих визуализировать, автоматизировать и максимально упростить процесс получения информации. Подготовлены и ждут финансирования несколько проектов современных приборов, которые могут быть ис-

пользованы для проведения электромагнитного мониторинга окружающей среды и обстановки при проведении исследовательских работ в локальных помещениях.

Уже созданные модели ДМ имеют отличный современный дизайн, малогабаритны, недороги, достаточно просты и удобны в эксплуатации, обслуживании и могут быть рекомендованы для различных исследовательских целей.

Литература

1. Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Григорьев О.А., Меркулов А.В.. Электромагнитная безопасность человека. Справочно-информационное издание. - Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999.
2. ГОСТ Р 51724-2001. Поле гипомангнитное. Методы измерений и оценки соответствия уровней полей техническим требованиям и гигиеническим нормативам.
3. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 188 с.
4. Sokol-Kutylovsky O.L. The effect of an amplitude-modulated high-frequency magnetic field on the noise of an amorphous ferromagnetic sensors. Measurement Techniques. 2012. T. 55. № 6. p. 702-705.
5. Sokol-Kutylovskii O.L. The recording of an extremely weak low-frequency magnetic field with a magnetomodulation sensor. Measurement Techniques. 2013. T. 56. № 4. p. 447-450.
6. Букреев В.С., Заруцкий А.А., Иваница А.И. Вопросы технологии изготовления датчиков феррозондовых магнитометров // Исследования по проблемам главного и аномального магнитных полей Земли. М.: ИЗМИРАН, 1992.
7. Кириаков В.Х., Любимов В.В. Новые приборы для исследования гипогеомагнитных полей и помещений // *Медицинская физика*. М., 2004. №.4(24). С.32–35.
8. Кириаков В.Х., Любимов В.В. Цифровой малогабаритный микропотребляющий магнитометр для различного применения // *Aktualni vymozenosti vedy – 2012* / Materialy VIII Mezinarodni vedecko-prakticka konference 27 cervna-05 cervencu 2012/Fyzika. Dil 20, Praha, 2012.S.12-19.
9. Любимов В.В. Обзор по магнитометрам, созданным в ИЗМИРАН. Часть 2: Инструментарий для электромагнитного мониторинга окружающей среды и некоторые результаты его применения // *Приднепровский научный вестник* /Физика: Геофизика, г. Днепр: «Наука и образование», 2018. Том 6. №12. С. 3-19.