

Копылов Владислав Маркович – e-mail: v.kopylov@rtc.ru; тел.: +78125526093; ведущий инженер.

Vasiliev Andrey Viktorovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC); e-mail: andrey@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125526093; cand. of eng. sc.; leading designer.

Shardyko Igor Vyacheslavovich – e-mail: i.shardyko@rtc.ru; phone: +78125526093; researcher.

Kopylov Vladislav Markovich – e-mail: v.kopylov@rtc.ru; phone: +78125526093; leading engineer.

УДК 621.317.39.084.2

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-215-226

Р.А. Жигалов, С.А. Матюнин, А.А. Иголкин

БЕСКОНТАКТНЫЙ ФЕРРОЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КЛАПАНА

Целью исследования является разработка бесконтактного феррозондового датчика положения для контроля открытого/закрытого состояния клапана. Существует множество примеров использования в современной технике элементов или устройств, взаимодействующих с магнитным полем. Одной из актуальнейших задач является использование влияния магнитного поля в качестве средства контроля или составляющей управляющей среды. Применение магнитооптических датчиков для контроля функционирования технических объектов обусловлено их бесконтактным способом измерения, возможностью измерения не только магнитных, но и других различных физических величин, относительной простотой, надежностью и дешевизной конструкции чувствительного элемента, гибкостью в применении, эксплуатацией в низкотемпературных и высокотемпературных средах. Одним из датчиков подобного типа является феррозондовый преобразователь магнитного поля. Примером объекта внедрения феррозондового датчика являются клапаны различных пневмогидравлических систем. Сущность поставленной задачи заключается в создании бесконтактного концевого переключателя золотника клапана, сигнализирующего о закрытом или открытом состоянии клапана и передающего эту информацию в систему контроля. Предлагается разбиение данной задачи на этапы и последовательное их выполнение. Сначала производится поиск и анализ уже существующих решений, литературы, посвященной теме исследования магнитных преобразователей. Далее, разрабатывается модельная конструкция датчика, согласно которой создаются геометрические 3D-модель и 2D-модель чувствительного элемента, выбирается предполагаемый материал составляющих элементов датчика. С помощью численных методов компьютерного моделирования и математических моделей моделируется работа датчика и определяются его выходные характеристики при различных режимах работы. По расчетным характеристикам выбирается и рассчитывается оптимальная конструкция и конфигурация чувствительного элемента датчика. По итогам моделирования разрабатываются сборочные и рабочие чертежи датчика. Предложенный способ решения задачи характеризуется сложностью изучения нелинейных магнитных систем и их моделирования. Результаты данного исследования могут быть рекомендованы для разработки магнитооптических датчиков подобного или иного типа и изучения материалов с нелинейными магнитными свойствами.

Феррозондовый датчик; магнитный датчик; численное моделирование; индукция; напряженность; клапан.

R.A. Zhigalov, S.A. Matyunin, A.A. Igolkin

NON-CONTACT FLUXGATE POSITION SENSOR FOR MONITORING THE STATE OF THE VALVE

The aim of the study is to develop a non-contact fluxgate position sensor to control the open / closed state of the valve. There are many examples of the use in modern technology of elements or devices that interact with a magnetic field. One of the most urgent tasks is to use the influence of the magnetic field as a means of control or as a component of the control environment. The use of magneto-optical sensors for monitoring the functioning of technical objects is due to their non-contact measure-

ment method, the ability to measure not only magnetic, but also various other physical quantities, the relative simplicity, reliability and low cost of the design of the sensitive element, flexibility in use, operation in low-temperature and high-temperature environments. One of the sensors of this type is a fluxgate magnetic field converter. Valves of various pneumohydraulic systems are an example of the object of introduction of a fluxgate sensor. The essence of the task is to create a non-contact limit switch of the valve spool, signaling the closed or open state of the valve and transmitting this information to the control system. It is proposed to divide this task into stages and their sequential implementation. First, a search and analysis of existing solutions, literature on the topic of research of magnetic transducers is carried out. Next, a model design of the sensor is developed, according to which a geometric 3D model and a 2D model of the sensing element are created, and the proposed material of the constituent elements of the sensor is selected. With the help of numerical methods of computer simulation and mathematical models, the operation of the sensor is simulated and its output characteristics are determined under various operating modes. According to the design characteristics, the optimal design and configuration of the sensor's sensing element is selected and calculated. As a result of the simulation, assembly and working drawings of the sensor are developed. The proposed method for solving the problem is characterized by the complexity of studying nonlinear magnetic systems and their modeling. The results of this study can be recommended for the development of magneto-optical sensors of this or another type and for the study of materials with nonlinear magnetic properties.

Fluxgate sensor; magnetic sensor; numerical simulation; induction; tension; valve.

Введение. В настоящее время датчики магнитного поля широко используются в различных областях науки и техники. Например, датчики магнитного поля позволяют бесконтактно и очень точно измерять расстояние до объектов, на которых размещен миниатюрный постоянный магнит. Данный принцип регистрации линейных и угловых перемещений и положений объектов в пространстве применяется в авто- и авиатехнике, автоматизированных станках и сборочных линиях в промышленности, системах ориентации стабилизации.

При разработке датчиков магнитного поля все чаще приходится решать задачи повышения их чувствительности, надежности, уменьшения массы, потребляемой мощности и снижения себестоимости.

Для многих практических применений важным является дистанционное бесконтактное измерение магнитного поля, и, в принципе, такие измерения можно осуществлять с помощью феррозондовых датчиков.

Феррозондовые магнитные преобразователи отличаются компактностью, дешевой конструкцией, гибкостью применения, высокой чувствительностью.

Постановка научной задачи. Требуется разработать бесконтактный феррозондовый датчик положения для контроля состояния клапана. На рис. 1. изображена модельная схема клапана и датчика.

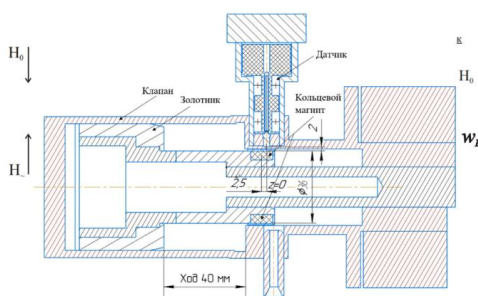


Рис. 1. Схема модели клапана и чувствительного элемента датчика

Основные элементы схемы – это корпус, золотник клапана и корпус размещаемого чувствительного элемента (ЧЭ). Золотник совершает поступательные перемещения, в крайнем левом положении клапан закрыт, в крайнем правом положении клапан открыт. Сущность задачи заключается в контроле текущего положения золотника клапана.

Литературно-патентный обзор. В настоящее время феррозондовые датчики широко используются для измерения магнитного поля Земли, измерения и индикации постоянно и медленно меняющихся магнитных полей. Феррозондовые датчики так же, как и другие магнитооптические датчики могут быть применены в системах контроля, слежения за технологическим объектом.

При проведении литературно-патентного исследования были найдены устройства, использующие феррозондовый преобразователь магнитного поля для контроля состояния объекта, локализации магнитопроводящих элементов и измерения магнитных величин. Также были найдены статьи и справочники, посвященные изучению магнитных преобразователей.

Преимущества датчика на феррозондовом методе заключаются в простоте, дешевизне и малогабаритности конструкции, отсутствии механической связи между контролируемым объектом и чувствительным элементом, возможности эксплуатации в условиях высоких и низких температур.

В учебнике Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника описаны различные преобразователи магнитного поля, в том числе и феррозондовые датчики [1–2]. Существует типовые варианты конструкции феррозондовых датчиков: одноэлементный стержневой датчик, дифференциальный датчик с разомкнутым сердечником, дифференциальный датчик с замкнутым сердечником.

На рис. 2 изображены различные варианты исполнения феррозондовых датчиков.

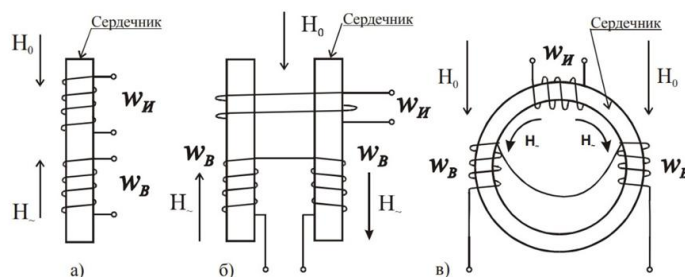


Рис. 2. Варианты конструкции феррозондов: а – одноэлементный стержневой; б – дифференциальный с разомкнутым сердечником; в – дифференциальный с замкнутым сердечником

Действие феррозонда основано на изменении магнитного состояния ферромагнетика под воздействием двух магнитных полей разных частот.

В простейшем варианте феррозонд состоит из ферромагнитного сердечника и находящихся на нем двух катушек: катушки возбуждения (ω_B), питаемой переменным током, и измерительной (сигнальной) катушки (ω_H).

Сердечник феррозонда выполняется из материалов с высокой магнитной проницаемостью.

На катушку возбуждения от специального генератора подается переменное напряжение с частотой от 1 кГц до 300 кГц. (в зависимости от уровня параметров и назначения прибора).

В отсутствие измеряемого магнитного поля сердечник под действием переменного магнитного поля (H_1), создаваемого током в катушке возбуждения, перемагничивается по симметричному циклу. Изменение магнитного поля, вызванное перемагничиванием сердечника по симметричной кривой, индуцирует в сигнальной катушке ЭДС, изменяющуюся по гармоническому закону. Если одновременно на сердечник действует измеряемое постоянное или медленно меняющееся магнитное поле (H_0), то кривая перемагничивания меняет свои размеры и форму и

становится несимметричной. При этом изменяется величина и гармонический состав ЭДС в сигнальной катушке. В частности, появляются четные гармонические составляющие ЭДС, величина которых пропорциональна напряженности измеряемого поля и которые отсутствуют при симметричном цикле перемагничивания.

Феррозонды подразделяются на: стержневые одноэлементные (рис. 2,а), дифференциальные с разомкнутым сердечником (рис. 2,б) и дифференциальные с замкнутым (кольцевым) сердечником (рис. 2,в).

Дифференциальный феррозонд (рис. 2,б,в), как правило, состоит из двух сердечников с обмотками, которые соединены так, что нечетные гармонические составляющие практически компенсируются. Тем самым упрощается измерительная аппаратура и повышается чувствительность феррозонда.

Дифференциальный феррозонд (рис. 2,б,в) состоит из двух сердечников с обмотками, которые соединены так, что нечетные гармонические составляющие практически компенсируются, что упрощает измерительную аппаратуру.

Феррозонды отличаются очень высокой чувствительностью к магнитному полю. Они способны регистрировать магнитные поля с напряженностью до $10^{-4} - 10^{-5}$ А/м ($\sim 10^{-10} - 10^{-11}$ Тл).

Современные конструкции феррозондов отличаются компактностью. Объем феррозонда, которым комплектуются отечественные магнитометры Г73, составляет менее 1 см^3 , а для магнитометра Г74 трехкомпонентный феррозонд вписывается в куб со стороной 15 мм.

На рис. 3 приведена конструкция и габариты миниатюрного стержневого феррозонда.

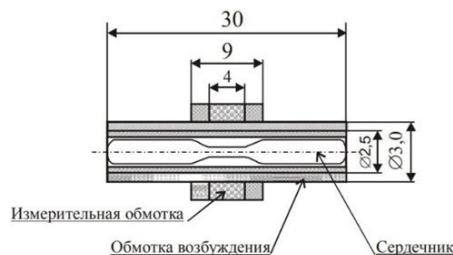


Рис. 3. Конструкция и габариты стержневого феррозонда

Сердечник феррозонда изготовлен из пермаллоя. Он имеет переменное по длине поперечное сечение, уменьшающееся примерно в 10 раз в центральной части сердечника, на которую нанесена измерительная обмотка. Такая конструкция обеспечивает при сравнительно небольшой длине (30 мм) высокую магнитную проницаемость ($1,5 \times 10^5$) и малое значение напряженности поля насыщения в центральной части сердечника, что приводит к увеличению фазовой и временной чувствительности феррозонда.

Диапазон измерения феррозондовых преобразователей типовой конструкции составляет от ± 50 А/м до ± 100 А/м (от $\pm 0,06$ до $\pm 0,126$ мТл).

В диссертации Барановой В. Е. описаны датчики магнитных полей на различных эффектах, в том числе и феррозондовые датчики [3]. Основное внимание в работе уделено описанию математической модели феррозондового преобразователя, расчетам и изготовлению системы катушек калибровки магнитных датчиков и феррозондового магнитометра.

Наибольшее распространение получили дифференциальные феррозонды как с разомкнутым сердечником (двухстержневой), так и с замкнутым (тороидальным) сердечником. Их внешний вид приведен на рис. 4.

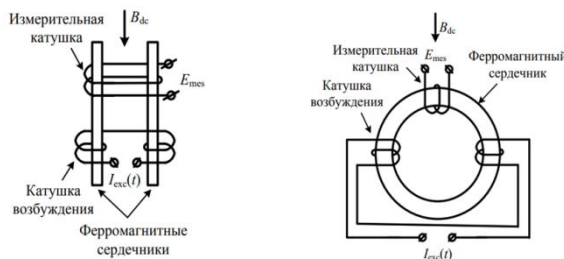


Рис. 4. Дифференциальные феррозонды с разомкнутым (слева) и с замкнутым сердечником (справа)

Дифференциальный феррозонд с разомкнутым сердечником содержит две обмотки, включенные встречно. Протекающий по ним ток возбуждения $I_{exc}(t)$ создает в объеме каждого сердечника напряженность магнитного поля возбуждения $H_{exc}(t)$. Эти поля характеризуются одинаковой амплитудой, но в противофазе. При наличии измеряемого постоянного поля H_{dc} , направленного вдоль сердечника, в объеме сердечников действуют суперпозиции напряженностей этих полей.

Суперпозиции напряженностей полей:

$$H_{\Sigma 1}(t) = H_{dc} + H_{exc}(t), \quad (1)$$

$$H_{\Sigma 2}(t) = H_{dc} - H_{exc}(t). \quad (2)$$

Индукции магнитного поля в идентичных сердечниках:

$$B_1(t) = f(H_{\Sigma 1}(t)) = f(H_{dc} + H_{exc}(t)), \quad (3)$$

$$B_2(t) = f(H_{\Sigma 2}(t)) = f(H_{dc} - H_{exc}(t)). \quad (4)$$

ЭДС, индуцированная в измерительной обмотке феррозонда, охватывающая оба сердечника:

$$E_{mes}(t) = -sw_2 \left(\frac{d}{dt} (B_1(t) + B_2(t)) \right). \quad (5)$$

Зависимость индукции магнитного поля в сердечниках:

$$B_1(t) = a_1 H_{dc} + a_1 H_{exc}(t) + a_3 H_{dc}^3 + 3a_3 H_{dc}^2 H_{exc}(t) + 3a_3 H_{dc} H_{exc}^2(t) + a_3 H_{exc}^3(t), \quad (6)$$

$$B_2(t) = a_1 H_{dc} - a_1 H_{exc}(t) + a_3 H_{dc}^3 - 3a_3 H_{dc}^2 H_{exc}(t) + 3a_3 H_{dc} H_{exc}^2(t) - a_3 H_{exc}^3(t). \quad (7)$$

Если феррозонд возбуждается переменным током синусоидальной формы $I_{exc}(t) = I_{exc.m} \sin(\omega t)$, то напряженность поля возбуждения:

$$H_{exc}(t) = H_{exc.m} \sin(\omega t) = \frac{w_1}{l} I_{exc.m} \sin(\omega t), \quad (8)$$

где $I_{exc.m}$ – амплитуда тока возбуждения, А,

w_1 – число витков в обмотке возбуждения феррозонда,

l – длина намотки обмотки возбуждения феррозонда, м,

ω – частота тока возбуждения, рад/с.

ЭДС в измерительной обмотке дифференциального феррозонда:

$$E_{mes}(t) = 6sw_2 a_3 \omega H_{dc} H_{exc.m}^2 \sin(2\omega t). \quad (9)$$

В справочнике под редакцией Пятин Ю. М. Постоянные магниты описаны изменения магнитных свойств различных марок магнитов и ферритов при изменении температуры окружающей среды [4]. Приведены температурные коэффициенты обратимых изменений характеристик магнитотвердых материалов и магнитного поля магнитных систем, а также математические модели для расчета изменения магнитных свойств.

При проведении патентного поиска наиболее близкими к разрабатываемому устройству по принципу действия и применению являются следующие патенты [5–14].

Известен патент RU0002457476 опубликован 27.07.2012., в котором раскрыт феррозондовый датчик для слежения за стыком свариваемых деталей [5]. На рис. 5 схематически изображена конструкция заявленного устройства.

Феррозондовый датчик содержит источник питания 1 сварочного тока, блок ввода магнитного поля, в который входят два токосъема 2 и 3, встроенные параллельно в цепь сварочного тока через электрод 8, и блок регистрации магнитного поля, состоящий из дифференциального феррозонда 9, содержащего обмотку возбуждения 11 и выходные обмотки 12. Обмотка возбуждения 11 подключена к задающему генератору 13 через делитель частоты на два 14. Феррозонд 9 жестко связан со сварочной головкой 10 и расположен над заваренным участком стыка и усилительного-преобразовательного тракта.

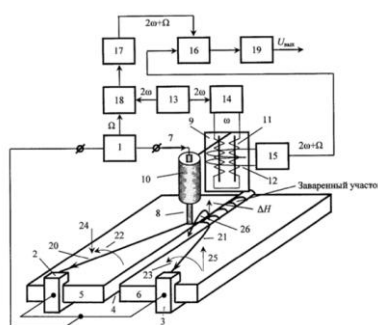


Рис. 5. Конструкция феррозондового датчика слежения за стыком свариваемых деталей

Усилительного-преобразовательный тракт содержит последовательно соединенные: избирательный усилитель 15, настроенный в резонанс на частоту $2\omega + \Omega$ (ω – частота возбуждения феррозонда, Ω – частота сварочного тока); фазовый дискриминатор 16, опорное напряжение которого формируется вторым избирательным усилителем 17, связанным с выходом модулятора 18, входы которого соединены с источником сварочного тока 1 и задающим генератором 13 частоты 2ω ; сглаживающий фильтр 19. В предлагаемом устройстве осуществляется выделение сигнала, пропорционального рассогласованию положений электрода и стыка на частоте $2\omega + \Omega$, что увеличивает помехозащищенность, а следовательно, и устойчивость слежения за стыком.

Феррозондовый датчик работает следующим образом. В процессе сварки сварочный ток, подводимый от источника 1 на электрод 8, разделяется на две составляющие 20 и 21, которые наводят магнитные поля 22 и 23 над свариваемыми деталями 5, 6.

При расположении электрода 8 точно над стыком 4 составляющие 20 и 21 сварочного тока не протекают через заваренный участок стыка 4. В связи с тем, что токосъемы расположены симметрично относительно стыка 4, вертикальные составляющие 24, 25 магнитных полей 22 и 23 равны по величине и противоположно направлены. Магнитное поле над свариваемыми деталями определяется горизонтальными составляющими полей 22 и 23 и полем сварочного тока, создаваемого электродом 8 в горизонтальной плоскости. Следовательно, проекция напряженности суммарного магнитного поля над заваренным участком стыка на ось чувствительности феррозонда 9 равна нулю, и выходной сигнал дифференциального феррозонда отсутствует.

При отклонении электрода 8 от стыка 4 составляющая 21 сварочного тока протекает через заваренный участок стыка 4 и проекция напряженности ΔH магнитного поля 26 (поле от тока, протекающего по заваренному участку) на ось чувствительности дифференциального феррозонда 9 характеризует величину и направление отклонения электрода 8 от стыка 4. Под действием этой составляющей (ΔH) напряженности магнитного поля в выходной обмотке 12 феррозонда 9 возникает э.д.с., в спектре которой присутствует составляющая с частотой $(2\omega + \Omega)$, величина и фаза которой несут информацию о величине и направлении отклонения электрода от стыка.

Преимущество данного устройства заключается в бесконтактном способе контроля и увеличении помехозащищенности за счет сведения к минимуму вероятности электромагнитных помех на комбинированной частоте $(2\omega + \Omega)$.

Также были найдены статьи, посвященные изучению феррозондовых преобразователей [15–18].

В статье Баранова П.Ф. Моделирование феррозондового датчика для описывается процесс создания модели датчика измерения остаточной намагниченности в программной среде численного моделирования COMSOL Multiphysics [15].

COMSOL Multiphysics – это программная среда для конечно-элементного анализа и мультифизического моделирования, она позволяет решать электрические, механические, гидродинамические, акустические и магнитные задачи [19–0].

В статье приводится создание и моделирование дифференциального феррозондового датчика, схема его конструкции приведена на рис. 6.

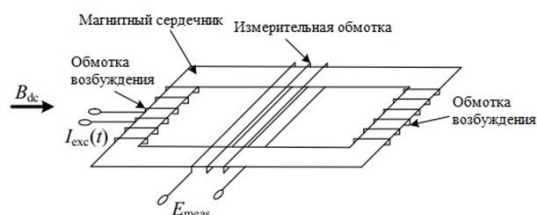


Рис. 6. Геометрия дифференциального феррозонда

Авторы статьи подробно описывают работу и настройку модели в программной среде для встроенного физического интерфейса и решателя. Даны рекомендации по оптимизации геометрии элемента и настройки материалов и конечного элемента сетки.

Проведенный литературно-патентный поиск подтверждает актуальность использования феррозондовых магнитных преобразователей для решения поставленной задачи.

За основу разрабатываемого феррозондового датчика для контроля состояния клапана предполагается выбрать дифференциальный тип датчика с единственным общим каркасом [1].

Разработка и моделирование конструкции датчика. Была разработана первоначальная конструкция датчика, сборочный чертеж катушки, чертеж корпуса чувствительного элемента, каркаса катушки и магнитопроводящей ленты, 2D и 3D модели чувствительного элемента.

Сначала предполагается провести моделирование магниточувствительного элемента, то есть самого феррозонда. На рис. 7 изображена модельная схема чувствительного элемента, расположенного в клапане.

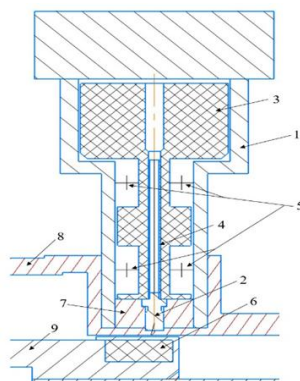


Рис. 7. Модельная схема феррозонда

Согласно рисунку, датчик состоит из корпуса 1, магнитного концентратора из магнитомягкого материала 2, повышающего чувствительность датчика, катушки 3, пермаллоевой ленты 4, измерительных обмоток и обмоток возбуждения 5 (условное обозначение), кольцевого магнита 6. Позициями 7, 8 и 9 обозначены крышки торцевые, корпус клапана и золотник.

В качестве среды моделирования феррозонда использовалась среда численного моделирования FEMM методом конечных элементов. Сущность моделирования конструкции датчика с помощью среды FEMM заключается в определении позиционных и температурных характеристик датчика, то есть зависимости величины магнитного поля, измеряемого чувствительным элементом, от изменения температуры в месте установки датчика.

Данная среда численного моделирования используется при решении линейных и нелинейных магнитоэстатических задач [21].

В первом приближении ставится задача определения изменения магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, от температуры. Для моделирования объекта в магнитном поле требуется указать материал, из которого состоит объект, или его магнитные свойства. На рис. 8 приведена конструкция с обозначением на ней материала, и кривая намагничивания стали 16Х. Как показано на рисунке, корпус датчика и магнитный концентратор изготовлены из магнитомягкой ферромагнитной стали 16Х, то есть связь между напряженностью поля и магнитной индукцией нелинейная. Сталь 12Х18Н10Т и 10Х11Н23Т3МР, из которых выполнены стенки клапана и золотник немагнитные, их магнитная проницаемость равна 1.

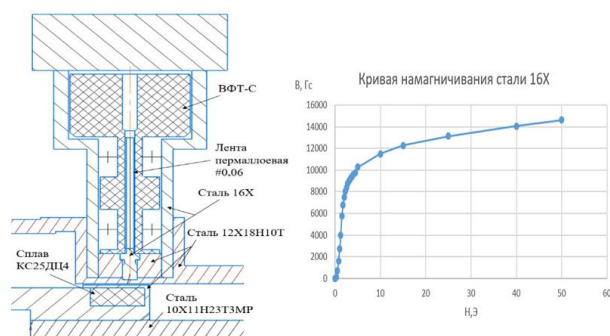


Рис. 8. Материал элементов датчика

Процесс расчета в среде FEMM следующий, сначала происходит разбиение области вычисления сеткой, далее в каждой подобласти численным методом ищется решение дифференциального уравнения распределения магнитного поля (рис. 9). Величина магнитного поля рассчитывается в плоскости сердечника феррозонда.

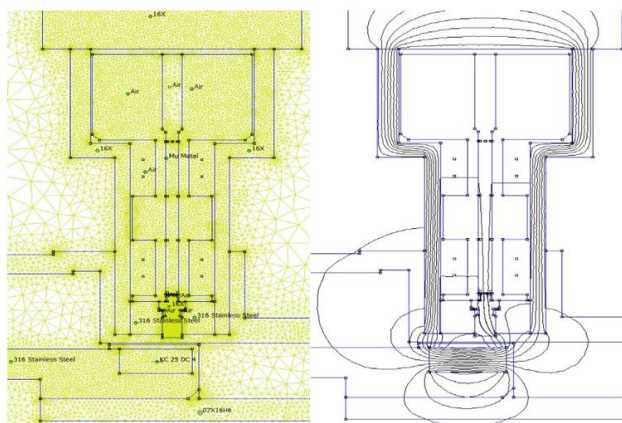


Рис. 9. Расчет в среде FEMM

В зоне установки чувствительного элемента ожидается изменение температуры от 20 до – 200 градусов Цельсия, что приводит к изменению индукции магнитного поля. Изменения магнитного поля обусловлено изменением магнитных свойств постоянного магнита. Далее во всем диапазоне перемещения шагом 1 мм рассчитывается отклонение величины индукции.

Значение напряженности и индукции магнитного поля в зависимости от положения магнита относительно оси магнитного концентратора и влияния изменения температуры приведены на рис. 10 и 11 соответственно.

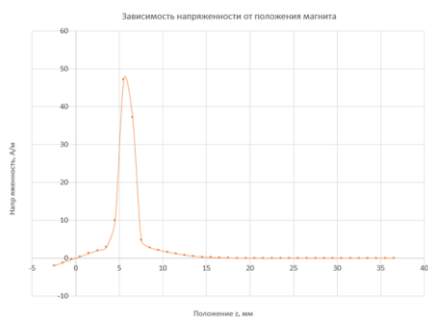


Рис. 10. Зависимость напряженности магнитного поля от положения магнита

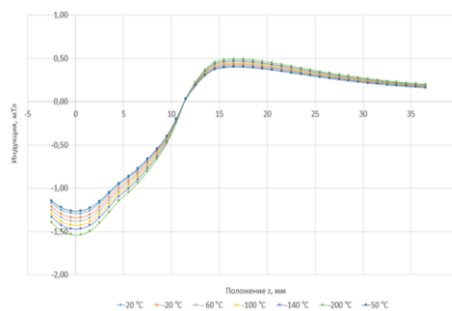


Рис. 11. Отклонение индукции при различных значениях температуры

Заключение. Проведенный литературно-патентный поиск и анализ уже существующих решений подтверждает актуальность использования феррозондового метода для решения поставленной задачи.

Приведенные в данной работе обзор типовых и существующих вариантов конструкции чувствительных элементов магнитных преобразователей [1–2, 5–14], математические модели для определения параметров феррозондового датчика [3], описание способов конечно-элементного моделирования с помощью программных

пакетов COMSOL и FEMM [15, 19–21], результаты расчетов позиционных характеристик для напряженности и индукции магнитного поля в зависимости от температуры среды в месте установки датчика могут быть рекомендованы для разработки и расчета параметров феррозондовых или других магнитных датчиков.

Полученные результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного решения и дают возможность разработки оптимальной конструкции бесконтактного датчика желаемой чувствительности и величины выходного сигнала.

Результаты исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России в области научной деятельности (Проект № FSSS-2023-0008).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бараночников М.Л.* Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – ДМК ПРЕСС, 2001. – 544 с.
2. *Бараночников М.Л.* Микромагнитоэлектроника. Т. 2. – ДМК ПРЕСС, 2002. – 691 с.
3. *Баранова В.Е.* Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика: дис. ... канд. техн. наук: защищена 12.01.16./ Муравьев Сергей Васильевич. – Т., 2015. – 134 с.
4. Постоянные магниты: Справочник / под ред. Ю.М. Пяа. – М.: Энергия. 1971. – 486 с.
5. Пат. 0002457476 Российская Федерация МПК⁷ G 01 N 27/82. Феррозондовый датчик для слежения за стыком свариваемых деталей / Браверман В.Я., Белоцерцев В.С., Лелеков А.Т.; заявитель и патентообладатель гос. образовательное учреждение высшего профессионального образования СибГАУ. – № 2010144736/28; заявл. 01.11.10; опубл. 27.07.12.
6. Пат. 0000197484 Российская Федерация МПК⁷ G 01 R 33/00. Датчик феррозондовый в магнитном экране / Цыбин Ю.Н., Брезинский А.А., Николаенко О.С.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Научно-исследовательский институт командных приборов». – №2020100561; заявл. 09.01.20; опубл. 30.04.20.
7. Пат. 02123303 Российская Федерация МПК⁷ A 61 B 17/50, A 61 B 5/06. Феррозондовый полюсоискатель // Пудов В.И., Реутов Ю.Я., Коротких С.А.; заявитель и патентообладатель Институт физики металлов Уральского отделения РАН. – №96120296/14; заявл. 08.10.96; опубл. 20.12.98.
8. Пат. 02315991 Российская Федерация МПК⁷ G 01 N 27/83. Модульный датчик для систем автоматизированного магнитного контроля рельсов / Горделий В.И. – №2006125395/28; заявл. 17.07.06; опубл. 27.01.2008.
9. Пат. 108983124 Китай МПК⁷ G 01 R 33/04. Магнитный датчик с обратной связью по состоянию насыщения / Ван Яньчжан, Ли Цзинци, Ши Цзякин; заявитель и патентообладатель JILIN UNIVERSITY. – №201811118866.7; заявл. 25.09.18; опубл. 11.12.18.
10. Пат. 210605010 Китай МПК⁷ G 01 V 3/08. Ферромагнитное устройство обнаружения для контроля ферромагнитных веществ в режиме пространственного позиционирования / Lyu Dongliang, Li Zhiming; заявитель и патентообладатель SHENZHEN NIMAGE TECHNOLOGY CO., LTD. – №201921468161.8; заявл. 05.09.2019; опубл. 22.05.20.
11. Пат. 210775814 Китай МПК⁷ G 01 R 33/04. Феррозондовый массив датчиков с возможностью обнаружения ориентации корабельных грузов / Luo Yubiao, Yang Lei, Xia Yuechun, Huang Xinglong, Liu Feibiao, Xiang Biao, Zeng Jiheng; заявитель и патентообладатель SHENZHEN LEILI TECHNOLOGY CO., LTD. – №201921549087.2; заявл. 18.09.2019; опубл. 16.06.2020.
12. Пат. 210981760 Китай МПК⁷ G 01 M 13/00. Устройство измерения механических характеристик автоматического выключателя на основе феррозондового датчика / Li Zhiguang; заявитель и патентообладатель SHIJIAZHUANG HANDY ELECTRICAL INSTRUMENTS CO., LTD. – № 201922172017.6; заявл. 06.12.2019; опубл. 10.07.2020.
13. Пат. 206270508 Китай МПК⁷ G 01 V 3/08. Устройство обнаружения металла / Yu Runqiao, Cheng Dongfang, Hu Bo, Xia Guisuo, Cheng Qiangqiang; заявитель и патентообладатель NINGBO YINZHOU CITAI ELECTRONIC SCIENCE & TECHNOLOGY CO., LTD. – №201621459612.8; заявл. 28.12.2016; опубл. 20.06.2017.
14. Пат. 6456069 США МПК⁷ G 01 33/04. Феррозондовый датчик магнитного поля, содержащий ферромагнитный исследуемый материал, в его магнитную цепь / Scarzello. John F., Holmes. John J., O'Keefe. Edward C.; заявитель и патентообладатель The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. – №09517559; заявл. 02.03.2000; опубл. 24.09.2002.
15. *Баранов П., Коломейцев А., Затонов И.* Моделирование феррозондового датчика // Materials Science and Engineering. – Томск, 2018.

16. *Танг С.К.* Схема возбуждения феррозондового датчика с использованием насыщающегося индуктора // *Sensors and Actuators A: Physical* / Департамент электронной техники, Исследовательский центр силовой электроники, Национальный университет Ирландии, Голуэй, Ирландия, 2004. – С. 156-165.
17. *Санков О.В., Легкий В.Н.* Исследование феррозондовых магнитных объектов для систем ближней локации // *Вестн. Моск. гос. тех. ун-та им. Н.Э. Баумана.* – 2009. – № 2 (75). – С. 90-101.
18. *Волков А.В., Реутов В.Я.* Феррозондовый компьютерный магнитометр. – Екатеринбург: Институт физики металлов Уро РАН, 2015. – С. 322-327.
19. *Янкин С.* Основы электротехнических расчетов в COMSOL Multiphysics // COMSOL Co. – Свободный режим доступа: <https://www.comsol.ru/video/intro-to-ac-dc-modeling-in-comsol-webinar-ru> (дата обращения: 30.01.2022).
20. *Davies N.* Modeling Transformers and inductors in COMSOL Multiphysics // COMSOL Co. – Свободный режим доступа: <https://cn.comsol.com/video/modeling-transformers-and-inductors-in-comsol-multiphysics> (дата обращения: 01.02.2022).
21. *Байда, Е.И.* Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. – 94 с.

REFERENCES

1. *Baranochnikov M.L.* Mikromagnitoelektronika [Micromagneto-electronics]. Vol. 1. DMK PRESS, 2001, 544 p.
2. *Baranochnikov M.L.* Mikromagnitoelektronika [Micromagneto-electronics]. Vol. 2. DMK PRESS, 2002, 691 p.
3. *Baranova V.E.* Izmerenie slabogo magnitnogo polya na osnove ferrozondovogo datchika: dis. ... kand. tekhn. nauk [Measurement of a weak magnetic field based on a fluxgate sensor: cand. of eng. sc. diss.]; defended 12.01.16., Murav'ev Sergey Vasil'evich. T., 2015, 134 p.
4. *Postoyannye magnity: Spravochnik* [Permanent magnets: Handbook], ed. by Yu.M. Pyaa. Moscow: Energiya. 1971, 486 p.
5. *Braverman V.Ya., Belozertsev V.S., Lelekov A.T.* Pat. 0002457476 Rossiyskaya Federatsiya MPK7 G 01 N 27/82. Ferrozondovyy datchik dlya slezheniya za stykom svariyaemykh detaley [Patent 0002457476 Russian Federation MPK7 G 01 N 27/82. Ferroprobe sensor for monitoring the joint of welded parts]; applicant and patent holder educational institution of higher professional education SibGAU. No. 2010144736/28; dec. 01.11.10; publ. 07/27/12.
6. *Tsybin Yu.N., Brezinskiy A.A., Nikolaenko O.S.* Pat. 0000197484 Rossiyskaya Federatsiya MPK7 G 01 R 33/00. Datchik ferrozondovyy v magnitnom ekrane [Patent 0000197484 Russian Federation MPK7 G 01 R 33/00. Ferroprobe sensor in a magnetic screen]; applicant and patent holder Joint-Stock Company Scientific Research Institute of Command Devices. No. 2020100561; dec. 01/09/20; publ. 04/30/20.
7. *Pudov V.I., Reutov Yu.Ya., Korotkikh S.A.* Pat. 02123303 Rossiyskaya Federatsiya MPK7 A 61 B 17/50, A 61 B 5/06. Ferrozondovyy polyusoiskatel' [Patent 02123303 Russian Federation MPK7 A 61 B 17/50, A 61 B 5/06. Ferroprobe pole detector]; applicant and patent holder Institute of Physics of Metals, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. No. 96120296/14; dec. 08.10.96; publ. 12/20/98.
8. *Gordeliy V.I.* Pat. 02315991 Rossiyskaya Federatsiya MPK7 G 01 N 27/83. Modul'nyy datchik dlya sistem avtomatizirovannogo magnitnogo kontrolya rel'sov [Patent 02315991 Russian Federation MPK7 G 01 N 27/83. Modular sensor for systems of automated magnetic control of rails]. No. 2006125395/28; dec. 07/17/06; publ. 01/27/2008.
9. *Van Yan'chzhan, Li TSzintszi, Shi Tszyakín.* Pat. 108983124 Kitay MPK7 G 01 R 33/04. Magnitnyy datchik s obratnoy svyaz'yu po sostoyaniyu nasyshcheniya [Pat. 108983124 China MPK7 G 01 R 33/04. Saturation Feedback Magnetic Sensor]; applicant and Patent Holder of JILIN UNIVERSITY. No. 201811118866.7; dec. 09/25/18; publ. 12/11/18.
10. *Lyu Dongliang, Li Zhimingю* Pat. 210605010 Kitay MPK7 G 01 V 3/08. Ferromagnitnoe ustroystvo obnaruzheniya dlya kontrolya ferromagnitnykh veshchestv v rezhime prostranstvennogo pozitsionirovaniya [Patent 210605010 China IPC7 G 01 V 3/08. Ferromagnetic Detection Device for Inspection of Ferromagnetic Substances in Spatial Positioning Mode]; applicant and Patentee of SHENZHEN NIMAGE TECHNOLOGY CO., LTD. No. 201921468161.8; dec. 09/05/2019; publ. 05/22/20.
11. *Luo Yubiao, Yang Lei, Xia Yuechun, Huang Xinglong, Liu Feibiao, Xiang Biao, Zeng Jiheng.* Pat. 210775814 Kitay MPK7 G 01 R 33/04. Ferrozondovyy massiv datchikov s vozmozhnost'yu obnaruzheniya orientatsii korabel'nykh gruzov [Patent 210775814 China MPK7 G 01 R 33/04. Ferroprobe sensor array capable of detecting ship cargo orientation]; applicant and patent holder SHENZHEN LEILI TECHNOLOGY CO., LTD. No. 201921549087.2; dec. 09/18/2019; publ. 06/16/2020.

12. *Li Zhiguang*. Pat. 210981760 Kitay MPK7 G 01 M 13/00. Ustroystvo izmereniya mekhanicheskikh kharakteristik avtomaticheskogo vyklyuchatelya na osnove ferrozondovogo datchika [Patent 210981760 China MPK7 G 01 M 13/00. Fluorescent probe based circuit breaker mechanical measurement device]; Applicant and Patent Holder of SHIJIAZHUANG HANDY ELECTRICAL INSTRUMENTS CO., LTD. No. 201922172017.6; dec. 12/06/2019; publ. 07/10/2020.
13. *Yu Runqiao, Cheng Dongfang, Hu Bo, Xia Guisuo, Cheng Qiangqiang*. Pat. 206270508 Kitay MPK7 G 01 V 3/08. Ustroystvo obnaruzheniya metalla [Patent 206270508 China IPC7 G 01 V 3/08. Metal detection device]; applicant and patentee NINGBO YINZHOU CITAI ELECTRONIC SCIENCE & TECHNOLOGY CO., LTD. No. 201621459612.8; dec. 12/28/2016; publ. 06/20/2017.
14. *Scarzello. John F., Holmes. John J., O'Keefe. Edward C.* Pat. 6456069 SSHA MPK7 G 01 33/04. Ferrozondovyy datchik magnitnogo polya, sodержashchiy ferromagnitnyy issleduemyy material, v ego magnitnuyu tsep' [Patent US 6456069 MPK7 G 01 33/04. Ferroprobe magnetic field sensor containing a ferromagnetic test material into its magnetic circuit]; applicant and Patentee of The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. No. 09517559; dec. 03/02/2000; publ. 09/24/2002.
15. *Baranov P., Kolomeyev A., Zatonov I.* Modelirovanie ferrozondovogo datchika [Modeling a fluxgate sensor], *Materials Science and Engineering*. Tomsk, 2018.
16. *Tang S.K.* Skhema vzbuzhdeniya ferrozondovogo datchika s ispol'zovaniem насыщчayushchegosya induktora [Excitation circuit for a fluxgate sensor using a saturable inductor], *Sensors and Actuators A: Physical*. Departament elektronnoy tekhniki, Issledovatel'skiy tsentr silovoy elektroniki, Natsional'nyy universitet Irlandii, Goluey, Irlandiya, 2004, pp. 156-165.
17. *Sankov O.V., Legkiy V.N.* Issledovanie ferrozondovykh magnitnykh ob'ektov dlya sistem blizhney lokatsii [Investigation of fluxgate magnetic objects for systems of near location], *Vestn. Mosk. gos. tekhn. un-ta im. N.E. Baumana* [Vestn. Moscow state those. un-ta im. N.E. Bauman], 2009, No. 2 (75), pp. 90-101.
18. *Volkov A.V., Reutov V.Ya.* Ferrozondovyy komp'yuternyy magnitometr [Ferrosonde computer magnetometer]. Ekaterinburg: Institut fiziki metallov Uro RAN, 2015, pp. 322-327.
19. *Yankin S.* Osnovy elektrotekhnicheskikh raschetov v COMSOL Multiphysics [Fundamentals of electrical calculations in COMSOL Multiphysics], *COMSOL Co.* Free access mode: <https://www.comsol.ru/video/intro-to-ac-dc-modeling-in-comsol-webinar-ru> (accessed 30 January 2022).
20. *Davies N.* Modeling Transformers and inductors in COMSOL Multiphysics, *COMSOL Co.* Free access mode: <https://cn.comsol.com/video/modeling-transformers-and-inductors-in-comsol-multiphysics> (accessed 01 February 2022).
21. *Bayda, E.I.* Raschet elektromagnitnykh i teplovykh poley s pomoshch'yu programmy FEMM [Calculation of electromagnetic and thermal fields using the FEMM program]. Khar'kov: NTU «KHPI», 2015, 94 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.А. Борминский.

Матюнин Сергей Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»; e-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru; г. Самара, Россия; тел.: +78462674443; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Иголкин Александр Алексеевич – e-mail: igolkin97@gmail.com; тел.: + 79171620062; д.т.н.; профессор; ведущий научный сотрудник.

Жигалов Роман Александрович – e-mail: zhigalovroman9@mail.ru; тел.: +79171516449.

Matyunin Sergey Alexandrovich – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Samara National Research University named after Academician S.P. Queen”; e-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru; Samara, Russia; phone: +78462674443; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

Igolkin Alexander Alekseevich – e-mail: igolkin97@gmail.com; phone: + 79171620062; dr. of eng. sc.; professor; leading researcher.

Zhigalov Roman Aleksandrovich – e-mail: zhigalovroman9@mail.ru; phone: +79171516449.