

20. *Mufiti I.H., Chow C.K., Stock F.T.* Solution of ill-conditioned linear two-point boundary value problems by the Riccati transformation, *SIAM Rev.*, 1969, Vol. 11 (4), pp. 616-619.
21. *Bryson A., Ho Yu-shih.* *Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya* [Applied theory of universal control]. Moscow: MIR, 1972, 544 p.
22. *Naidu D.S.* Optimal control systems. Electrical Engineering Handbook. Florida, Boca Raton: CRC Press, 2003, 275 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.В. Малолетов.

Кабанов Алексей Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет»; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; г. Севастополь, Россия; тел.: +79787622582; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

Крамарь Вадим Александрович – e-mail: kramarv@mail.com.com; тел: +79787927340; г.н.с.; д.т.н. профессор.

Зуев Александр Валерьевич – Институт проблем морских технологий ДВО РАН»; e-mail: zuev@dvo.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79149617735; зав. лабораторией; к.т.н.; доцент.

Филаретов Владимир Федорович – e-mail: filaretov@inbox.ru; тел. +79146890082; зав. лабораторией; д.т.н.; профессор.

Жиравок Алексей Нилович – Дальневосточный федеральный университет; e-mail: zhirabok@mail.ru; г. Владивосток, Россия; д.т.н.; профессор.

Kabanov Aleksei Alexandrovich – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University"; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; Sevastopol, Russia; phone: +79787622582; head of the department; cand. of eng. sc.; associate hrofessor.

Kramar Vadim Alexandrovich – e-mail: kramarv@mail.com.com; phone: +79787927340; Chief researcher; dr. of eng. sc; professor.

Zuev Aleksandr Valerievich – Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: zuev@dvo.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79149617735; head of the laboratory; cand. of eng. sc.; associate professor.

Filaretov Vladimir Fedorovich – e-mail: filaretov@inbox.ru; phone: +79146890082; head of the laboratory; dr. of eng. sc; professor.

Zhirabok Aleksei Nilovich – Far Eastern Federal University; e-mail: zhirabok@mail.ru; Vladivostok, Russia; dr. of eng. sc; professor.

УДК 621.317.39.084.2

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-204-217

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 немало 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 дешевой конструкцией чувствительного элемента, гибкостью в применении, эксплуатацией в низкотемпературных и высокотемпературных средах. Одним из датчиков подобного типа является феррозондовый преобразователь маг-

нитного 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, реализующих датчик положения с использованием феррозондового метода контроля для усовершенствования разрабатываемой конструкции. Далее, разрабатывается первоначальная конструкция чувствительного элемента феррозондового преобразователя, согласно начальной конструкции, создается геометрическая 3D-модель чувствительного элемента, выбирается предполагаемый материал составляющих элементов датчика. С помощью численных методов компьютерного моделирования моделируется работа датчика и определяется его выходная характеристика 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.

Бесконтактный датчик; Феррозондовый датчик; 3D-модель; COMSOL; чувствительный элемент; Пермаллой; моделирование; датчик положения; магнитооптический датчик.

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 measurement 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 that implement the position sensor using the fluxgate control method is carried out to improve the design being developed. Next, the initial design of the sensitive element of the fluxgate transducer is developed, according to the initial design, a geometric 3D model of the sensitive element is created, and the proposed material of the constituent elements of the sensor is selected. With the help of numerical methods of computer simulation, the operation of the sensor is simulated and its output characteristic is 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.

Contactless sensor; Ferrosonde sensor; 3D model; COMSOL; sensing element; Permalloy; simulation; position sensor; magneto-optical sensor.

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.

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 задачи. Требуется разработать бесконтактный датчик положения для контроля состояния клапана. На рис. 1. изображена модельная схема пологого клапана.

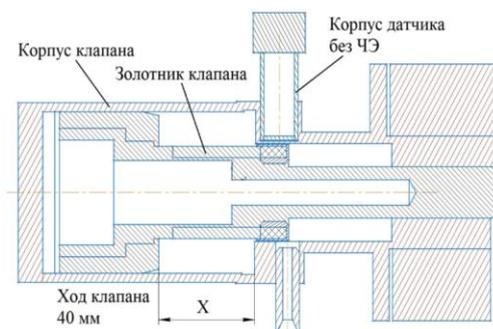


Рис. 1. Схема модели клапана

Основные элементы схемы – это корпус, золотник клапана и корпус размещаемого датчика (чувствительный элемент (ЧЭ) не изображен). 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 на основе феррозондового метода.

Преимущества датчика на данном эффекте 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.

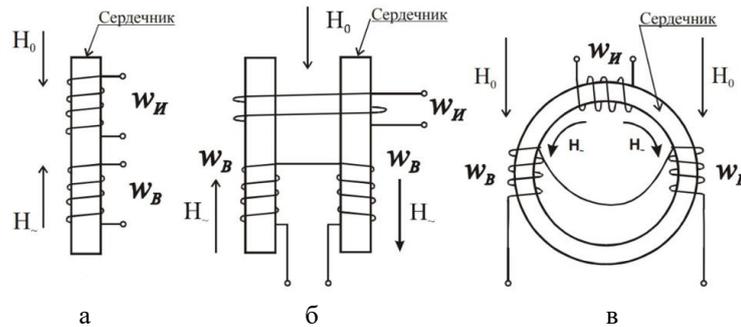


Рис. 2. Варианты конструкции феррозондов: а – одноэлементный стержневой; б – дифференциальный с разомкнутым сердечником; в – дифференциальный с замкнутым сердечником

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_I).

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.

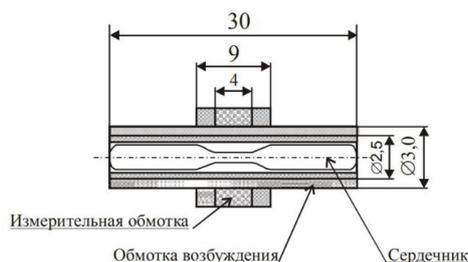


Рис. 3. Конструкция и габариты стержневого феррозонда

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). Плотность магнитного шума в полосе частот до 0,1 Гц для феррозондов со стержневыми сердечниками составляет от 30 до 40 мкА/м ($\text{м} \times \text{Гц}^{1/2}$) в зависимости от поля возбуждения, уменьшаясь с увеличением последнего. В полосе частот до 0,5 Гц плотность шума оказывается в 3–3,5 раза выше. При экспериментальном исследовании кольцевых феррозондов установлено, что уровень шума у них на порядок ниже, чем у феррозондов со стержневыми сердечниками.

При проведении патентного поиска наиболее близкими к разрабатываемому устройству по принципу действия и применению являются следующие патенты [3–12]. Рассмотрим некоторые из них.

Известен патент RU0002457476 опубликован 27.07.2012., в котором раскрыт феррозондовый датчик для слежения за стыком свариваемых деталей [3]. На рис. 4 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.

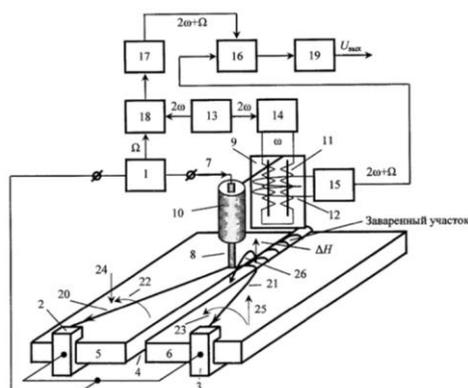


Рис. 4. Конструкция феррозондового датчика слежения за стыком свариваемых деталей

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 ($2\omega + \Omega$).

Известен патент RU0000197484 опубликован 30.04.2020., в котором раскрыт феррозондовый датчик в магнитном экране [4]. На рис. 5 приведена конструкция и схема устройства.

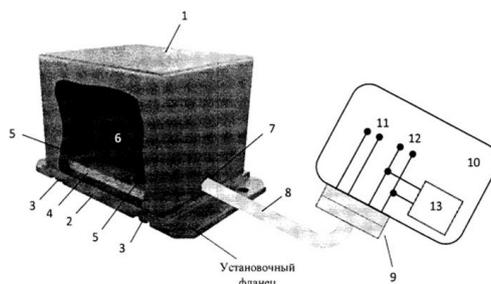


Рис. 5. Феррозондовый датчик в магнитном экране

Феррозондовый датчик в магнитном экране содержит ферромагнитный корпус 1 прямоугольной формы, одна грань у которого отсутствует, съемное ферромагнитное основание 2, которое крепится винтами 3 к торцам граней ферромагнитного корпуса 1. Диамагнитное основание 4 крепится винтами 5 к съемному ферромагнитному основанию 2 с внутренней стороны ферромагнитного корпуса 1. Магниточувствительный элемент (МЧЭ) 6 крепится на диамагнитное основание 4 крепежными элементами. На одной грани ферромагнитного корпуса 1 со стороны торца прорезан паз 7. Выводы гибкого кабеля 8, проходящего через паз 7 соединяются с одной стороны с выводами МЧЭ 6 (посредством пайки или через диамагнитный соединитель). Электрические цепи МЧЭ 6, проходящие через гибкий кабель 8 и внешний соединитель 9, выводятся в электронный блок 10, в котором обозначены как выводы обмотки возбуждения 11 и выводы сигнальной обмотки 12. К выводам 12 сигнальной обмотки МЧЭ подключен генератор постоянного тока 13. Частным случаем прямоугольной формы ферромагнитного корпуса 1 является куб.

Устройство работает следующим образом. На выводы обмотки возбуждения 12 подают напряжение возбуждения МЧЭ 6. В сердечнике МЧЭ 6 создают магнитное поле (МП) постоянным током, поступающим в обмотку МЧЭ 6 от источника постоянного тока 13. Это эталонное МП является эквивалентом МП в этом же сердечнике при воздействии внешнего МП стандартного эталона или колец Гельмгольца в отсутствии ферромагнитного корпуса 1. При этом на выводах сигнальной обмотки 12 формируется сигнал равноценный сигналу, получаемому от воздействия внешнего МП на стандартный МЧЭ 6, предназначенного для комплектования магнитометра.

Установка МЧЭ 6 на диамагнитном основании 4 обеспечивает унификацию дорогостоящих ферромагнитного корпуса 1 и съемного ферромагнитного основания 2. При смене конструктивного типа МЧЭ 6 соответственно меняется диамагнитное основание 4, изготавливаемое из не дорогих не дефицитных и не требующих специальной обработки материалов, например, алюминий, латунь. В случае использования устройства для контроля параметров элементов магнитометра без температурного воздействия диамагнитное основание 4 может быть изготовлено с применением пластмасс, например, текстолита. Введение паза 7 с использованием гибкого кабеля 8 позволяет повысить оперативность замены МЧЭ 6.

Введенные конструктивные изменения датчика феррозондового в магнитном экране повышают оперативность (производительность труда) как в случае его использования для контроля характеристик серийно изготавливаемых МЧЭ 6, например, температурных испытаниях, так и для контроля параметров элементов магнитометров с МЧЭ различного конструктивного исполнения.

Также были найдены статьи, посвященные изучению феррозондовых преобразователей [13–17].

В статье Баранова П.Ф. Моделирование феррозондового датчика для описывается процесс создания модели датчика измерения остаточной намагниченности в программном среде численного моделирования COMSOL Multiphysics [13].

COMSOL Multiphysics – это программная среда для конечно-элементного анализа и мультифизического моделирования, она позволяет решать электрические, механические, гидродинамические, акустические и магнитные задачи [18–20].

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

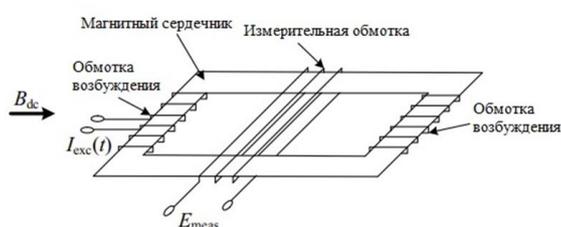


Рис. 6. Геометрия дифференциального феррозонда

На рис. 6 изображена геометрическая модель датчика и сформированная расчетная сетка, созданные в среде COMSOL.

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. В заключении статьи приводится график выходного сигнала измерительной обмотки смоделированного феррозондового датчика (рис. 6). Как изображено на рис. 6 слева можно увидеть геометрическую 3D-модель датчика и сформированная расчетная сетка, созданные в среде COMSOL, а справа – выходную характеристику датчика.

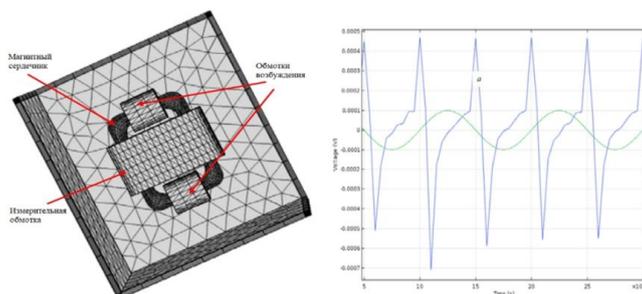


Рис. 7. 3D-модель датчика и его выходная характеристика

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].

В качестве среды для моделирования предполагается использование среды COMSOL Multiphysics, поскольку данное программное обеспечение удовлетворяет требованиям к используемому функционалу программной среды.

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

Сначала предполагается провести моделирование магниточувствительного элемента без корпуса датчика, то есть самого феррозонда. Для этого была построена геометрическая модель каркаса катушки и ее обмоток в программном комплексе САПР SolidWorks.

На рис. 8 изображена модель феррозонда, построенная в SolidWorks, а на рис. 9 – модель в разрезе с обозначением ее составляющих элементов.

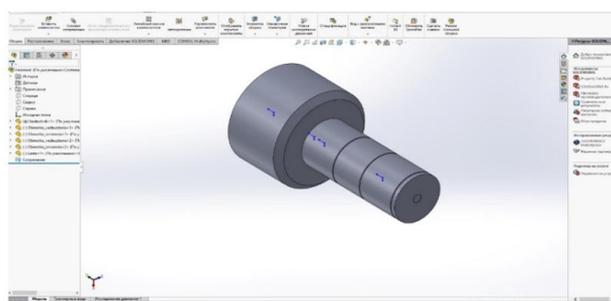


Рис. 8. Геометрическая модель феррозонда

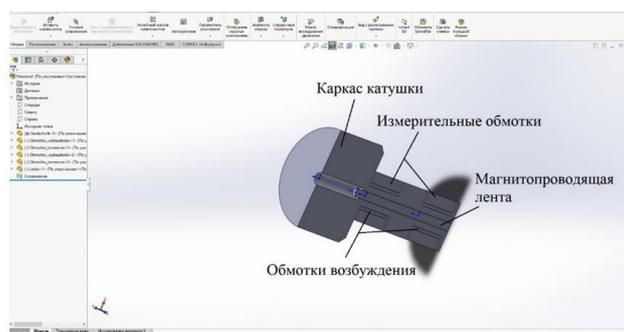


Рис. 9. Модель феррозонда в разрезе

Как видно из рисунка 9 феррозонд состоит из каркаса, двух обмоток возбуждения, двух измерительных обмоток и магнитопроводящей ленты.

Принцип работы феррозонда следующий, обмотки возбуждения запитываются переменным напряжением, возникает переменное магнитное поле, воздействующее на магнитопроводящую ленту, лента под действием переменного магнитного поля, создаваемого током в обмотках возбуждения, перемагничивается по симметричному циклу. Изменение магнитного поля, вызванное перемагничиванием ленты по симметричной кривой, индуцирует в обмотках измерения ЭДС, изменяющуюся по гармоническому закону.

При приближении постоянного магнита к магнитопроводу магнитопроводящая лента входит в насыщение, и кривая перемагничивания меняет свои размеры и форму, становясь несимметричной. При этом изменяется величина и гармонический состав ЭДС в измерительных обмотках.

Таким образом, в основе датчика положения клапана лежит контроль изменения магнитного поля.

В качестве среды моделирования феррозонда предполагается выбрать COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics – это интегрированная среда для численного моделирования на основе метода конечных элементов и граничных элементов. COMSOL Multiphysics имеет многомодульную структуру, в данной среде возможно моделировать электротехнические, механические, гидродинамические, акустические и другие процессы, помимо этого имеется возможность производить мультифизические расчеты с учетом взаимного влияния различных процессов [18].

На рис. 10, 11, 12 изображается процесс работы в среде COMSOL. На рис. 10 показана импортированная модель из SolidWorks в среду COMSOL, на рис. 11 – осуществляется настройка электрических компонентов модели, в данном случае настройка и выделение граней обмоток катушек, а на рис. 12 – изображены сформированные расчетные сетки.

На данном этапе была произведена первичная настройка расчетной модели, далее планируется ее отладка, доработка и получение выходных характеристик моделируемого датчика.

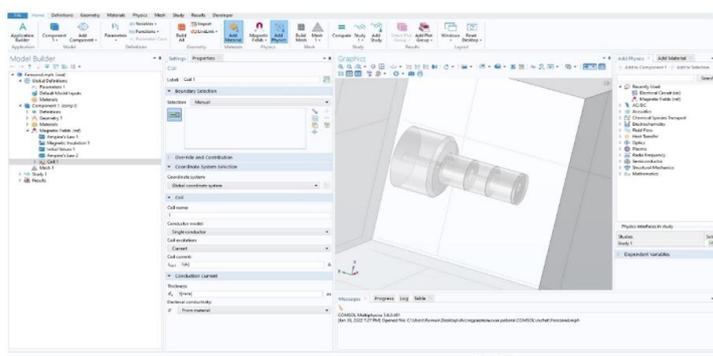


Рис. 10. Импортированная модель феррозонда в среде COMSOL

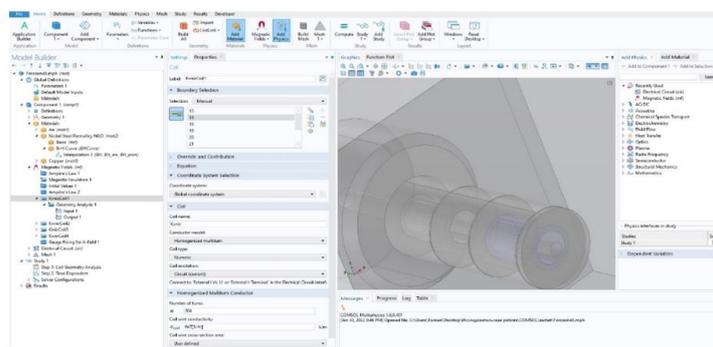


Рис. 11. Настройка свойств обмоток в среде COMSOL

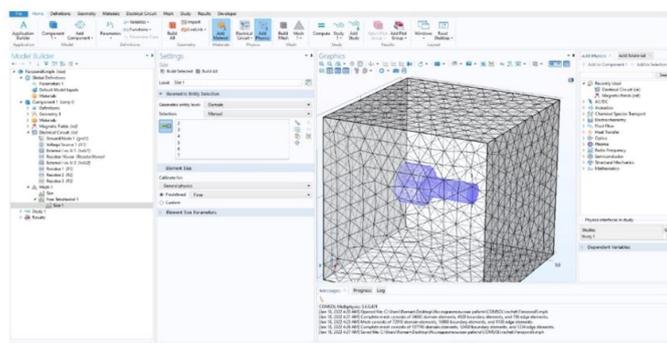


Рис. 12. Внешняя и внутренняя расчета сетка модели феррозонда

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

Планируется отладка, доработка и совершенствование расчетной модели в среде COMSOL. Дальнейшим этапом является получение выходных характеристик чувствительного элемента при различных режимах работы датчика.

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. Пат. 0002457476 Российская Федерация МПК⁷ G 01 N 27/82. Феррозондовый датчик для слежения за стыком свариваемых деталей / Браверман В.Я., Белозерцев 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Пат. 210605010 Китай МПК⁷ G 01 V 3/08. Ферромагнитное устройство обнаружения для контроля ферромагнитных веществ в режиме пространственного позиционирования / Liu Dongliang, Li Zhiming; заявитель и патентообладатель SHENZHEN NIMAGE TECHNOLOGY CO., LTD. – №201921468161.8; заявл. 05.09.2019; опубл. 22.05.20.
9. 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.
10. 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.

11. Пат. 206270508 Китай МПК⁷ G 01 V 3/08. Устройство обнаружения металла / Yu Runqiao, Cheng Dongfang, Hu Bo, Xia Guisuo, Cheng Qiangqiang; заявитель и патенто-обладатель NINGBO YINZHOU CITAI ELECTRONIC SCIENCE & TECHNOLOGY CO., LTD. – №201621459612.8; заявл. 28.12.2016; опубл. 20.06.2017.
12. 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.
13. Баранов П. Коломейцев А., Затонов И. Моделирование феррозондового датчика // Materials Science and Engineering. – Томск, 2018.
14. Баранова В.Е. Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика: дис. ... канд. техн. наук: защищена 12.01.16 / Муравьев Сергей Васильевич. – Томск, 2015. – 134 с.
15. 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.
16. Санков О.В., Лежкий В.Н. Исследование феррозондовых магнитных объектов для систем ближней локации // Вестник Московского государственного технического ун-та им. Н.Э. Баумана. – 2009. – № 2 (75). – С. 90-101.
17. Волков А.В., Реутов В.Я. Феррозондовый компьютерный магнитометр. – Екатеринбург: Институт физики металлов Уро РАН, 2015. – С. 322-327.
18. Янкин С. Интеграция пакетов COMSOL и SOLIDWORKS // COMSOL Co. – Свободный режим доступа: <https://www.comsol.ru/video/18-minutes-intro-to-liveliink-for-solidworks-webinar-ru> (дата обращения: 01.02.2022).
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).

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. Braverman V.Ya., Belozertsev V.S., Lelekov A.T. Patent 0002457476 Russian Federation MPK7 G 01 N 27/82. Ferrozondovyy datchik dlya slezheniya za stykom svariyaemykh detaley [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.
4. Tsybin Yu.N., Brezinskiy A.A., Nikolaenko O.S. Patent 0000197484 Russian Federation MPK7 G 01 R 33/00. Datchik ferrozondovyy v magnitnom ekrane [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.
5. Pudov V.I., Reutov Yu.Ya., Korotkikh S.A. Patent 02123303 Russian Federation MPK7 A 61 B 17/50, A 61 B 5/06. Ferrozondovyy polyusoiskatel' [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.
6. Gordeliy V.I. Patent 02315991 Russian Federation MPK7 G 01 N 27/83. Modul'nyy datchik dlya sistem avtomatizirovannogo magnitnogo kontrolya rel'sov [Modular sensor for systems of automated magnetic control of rails], No. 2006125395/28; dec. 07/17/06; publ. 01/27/2008.
7. Van Yan'chzhan, Li Tszjintzi, Shi Tszyakin. Patent 108983124 China MPK7 G 01 R 33/04. Magnitnyy datchik s obratnoy svyaz'yu po sostoyaniyu nasyshcheniya [Saturation Feedback Magnetic Sensor]; applicant and Patent Holder of JILIN UNIVERSITY. No. 201811118866.7; dec. 09/25/18; publ. 12/11/18.

8. *Lyu Dongliang, Li Zhiming*. Patent 210605010 China IPC7 G 01 V 3/08. Ferromagnitnoe ustroystvo obnaruzheniya dlya kontrolya ferromagnitnykh veshchestv v rezhime prostranstvennogo pozitsionirovaniya [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.
9. *Luo Yubiao, Yang Lei, Xia Yuechun, Huang Xinglong, Liu Feibiao, Xiang Biao, Zeng Jiheng*. Patent 210775814 China MPK7 G 01 R 33/04. Ferrozondovyy massiv datchikov s vozmozhnost'yu obnaruzheniya orientatsii korabel'nykh грузов [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.
10. *Li Zhiguang*. Patent 210981760 China MPK7 G 01 M 13/00. Ustroystvo izmereniya mekhanicheskikh kharakteristik avtomaticheskogo vyklyuchatelya na osnove ferrozondovogo datchika [Fluorescent probe based circuit breaker mechanical measurement device Applicant and Patent Holder of SHIJIAZHANG HANDY ELECTRICAL INSTRUMENTS CO., LTD. No. 201922172017.6; dec. 12/06/2019; publ. 07/10/2020.
11. *Yu Runqiao, Cheng Dongfang, Hu Bo, Xia Guisuo, Cheng Qiangqiang*. Patent 206270508 China IPC7 G 01 V 3/08. Ustroystvo obnaruzheniya metalla [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.
12. *Scarzello John F., Holmes John J., O'Keefe Edward C*. Patent US 6456069 MPK7 G 01 33/04. Ferrozondovyy datchik magnitnogo polya, sodержashchiy ferromagnitnyy issleduemyy material, v ego magnitnyuyu tsep' [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.
13. *Baranov P. Kolomeytshev A., Zatonov I*. Modelirovanie ferrozondovogo datchika [Modeling a fluxgate sensor], *Materials Science and Engineering* [Materials Science and Engineering]. Tomsk, 2018.
14. *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. Tomsk, 2015, 134 p.
15. *Tang S.K*. Skhema vzbuzhdeniya ferrozondovogo datchika s ispol'zovaniem nasyschayushchegosya induktora [Excitation circuit for a fluxgate sensor using a saturable inductor], *Sensors and Actuators A: Physical* [Sensors and Actuators A: Physical]. Department of Electronics, Power Electronics Research Center, National University of Ireland, Galway, Ireland, 2004, pp. 156-165.
16. *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] *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo un-ta im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University], 2009, No. 2 (75), pp. 90-101.
17. *Volkov A.V., Reutov V.Ya*. Ferrozondovyy komp'yuternyy magnitometr [Ferrosonde computer magnetometer]. Ekaterinburg: Institut fiziki metallov Uro RAN, 2015, pp. 322-327.
18. *Yankin S*. Integratsiya paketov COMSOL i SOLIDWORKS [Integration of COMSOL and SOLIDWORKS packages], *COMSOL Co*. Free access mode: <https://www.comsol.ru/video/18-minutes-intro-to-livelink-for-solidworks-webinar-ru> (accessed 01 February 2022).
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).

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.

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

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

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.

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

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