

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 620.179.143

https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-73-83

Брякин И.В.<sup>1</sup>, Бочкарев И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек

<sup>2</sup> Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек

**ФЕРРОЗОНД С МУЛЬТИФАКТОРНЫМ РЕЖИМОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Рассмотрены системы возбуждения известных ферроиндукционных преобразователей (ФИП). Предложен вариант ФИП с новым мультифакторным способом возбуждения, основанным на совместном действии электромагнитно-акустического (ЭМА) и магнитомодуляционного (ММЭ) эффектов. Описан вариант конструктивного решения феррозондового датчика (ФД), реализующего предложенный способ возбуждения. Подробно рассмотрены физические процессы, положенные в основу данного технического решения. Показано, что в предложенном датчике одновременно реализуются пять режимов функционирования, сопровождаемые соответствующими физическими эффектами: 1) режим мостового индуктивно-емкостного делителя напряжения; 2) режим ЭМА-преобразователя, реализующего процесс возникновения пространственно-периодических акустических волн; 3) режим  $\mu$ -преобразования за счет ЭМА-эффекта; 4) режим индуктора, при котором измерительные катушки помимо своего прямого назначения дополнительно выполняют функции элементов формирования возбуждающего магнитного поля; 5) режим  $\mu$ -преобразования за счет ММЭ. Проведенный анализ возникающих физических эффектов и их аналитическое описание показали, что предлагаемый ФД с мультифакторным режимом возбуждения обладает следующими преимуществами: 1) существенным конструктивным упрощением, которое связано с тем, что измерительные катушки совмещают такие две функции, как генерация переменного магнитного поля возбуждения и регистрация информационного сигнала; 2) повышенной помехозащищенностью за счет использования измерительных катушек в качестве плечевых элементов емкостно-индуктивного измерительного моста с разностным сигналом его измерительной диагонали, что обеспечивает компенсацию синфазных составляющих помехи и последствий температурного дрейфа; 3) повышенной чувствительностью без ухудшения точности преобразования за счет использования различных физических эффектов при резонансном воздействии соответствующими физическими полями; 4) пониженным энергопотреблением.

**Ключевые слова:** ферроиндукционный преобразователь, феррозондовый датчик, электромагнитное поле, электромагнитно-акустический эффект, акустические волны, напряженность переменного магнитного поля, вихревые токи, модуляция магнитной проницаемости

**ВВЕДЕНИЕ**

В состав измерительных приборов и систем, предназначенных для получения сведений о физических параметрах объекта измерений, входят различные типы преобразователей. Так, в магнитной дефектоскопии для выявления подповерхностных дефектов, при аэромагнитных исследованиях земной коры, при поиске и локации скрытых подповерхностных объектов, при геофизических исследованиях для измерений напряженности и магнитной индукции магнитного поля Земли, в исследованиях магнитных полей космического пространства, а также для решения большого количества других задач используют ферроиндукционные (ферромодуляционные) преобразователи. Очевидно, что значимость и важность таких измерений определяют наличие большого многообразия способов и средств магнитометрии [1-6]. При этом, введением целого ряда положительных качеств, широкое распространение имеют ФИП, содержащие в своем составе феррозондовый датчик [7-10]. Например, феррозондовый метод неразрушающего контроля основан на обнаружении феррозондовым датчиком магнитных полей рассеяния, возникающих в зоне подповерхностных дефектов, и предназначен для выявления в контролируемом объекте наличия трещин, раковин и т.п. [11].

ФД по сравнению с другими датчиками имеют ряд преимуществ, а именно: небольшие габариты и потребляемую мощность, высокие чувствительность и

надежность работы, стойкость к внешним воздействиям и др. Поэтому ФИП на базе ФД находятся в процессе постоянных исследований, направленных на совершенствование их основного функционального элемента – ФД [12-16]. Следовательно, задача совершенствования ФД для прецизионных ФИП является актуальной, а исследования в данной области имеют важное научно-техническое и практическое значение.

**АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ФЕРРОИНДУКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

ФИП представляют собой достаточно сложную электромагнитную систему, содержащую в качестве основных рабочих узлов ферромагнитный элемент (сердечник) и одну или несколько обмоток, выполняющих функции возбуждающих или измерительных элементов. Сердечники выполняются из магнитомягкого материала – пермаллоя и имеют большое количество конструктивных модификаций: с различным количеством и конфигурацией стержней; с разомкнутыми и замкнутыми сердечниками; в виде напыления и т.д.

Чувствительным элементом в ФИП является ферромагнитный сердечник. Обычно используются активные ФИП, в которых используют соответствующие узлы для возбуждения магнитного поля. Работа таких ФИП основана на изменении под воздействием измеряемого магнитного поля магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнитного сердечника, возбуждаемого переменным магнитным полем с постоянной напряженностью. Указанные изменения отражаются в наведенной

в измерительной обмотке ЭДС, которая и является выходным информационным сигналом.

В общем случае ФИП различают способом возбуждения ферромагнитного сердечника. Поэтому, прежде чем перейти к рассмотрению особенностей разработанного способа возбуждения ФД, кратко рассмотрим особенности известных типов преобразователей.

Известны три основных способа возбуждения сердечника ФИП: 1 – механическое; 2 – тепловое; 3 – магнитное [1]. Конструктивно указанные способы возбуждения реализуются следующим образом.

Работа ФИП первого типа основана на применении *механического элемента возбуждения*, например кварцевой пластинки, которая под действием подаваемого на нее электрического напряжения резонансной частоты периодически изменяет свои линейные размеры (обратный пьезоэлектрический эффект) и воздействует тем самым на контактируемый с ней ферромагнитный сердечник. Это приводит к периодическому изменению магнитной проницаемости сердечника. Поскольку на сердечник воздействует также измеряемое магнитное поле, то наводимая ЭДС в измерительной катушке будет прямо пропорциональна индукции  $B$ , измеряемого поля. Однако при явной простоте реализации данный способ возбуждения преобразователя обеспечивает невысокую чувствительность за счет незначительного диапазона изменения магнитной проницаемости.

ФИП второго типа с *тепловым возбуждением* содержит в качестве элемента возбуждения тепловой инжектор с малой тепловой инерционностью, к которому прижат ферромагнитный элемент, выполненный из материала с низкой точкой Кюри. По инжектору одновременно пропускают постоянный и переменный ток, обеспечивая тем самым пульсацию температуры пластинки вблизи точки Кюри и, соответственно, пульсацию ее магнитной проницаемости. При дополнительном воздействии на сердечник внешнего контролируемого магнитного поля ЭДС, наводимая в измерительной катушке, будет пропорциональной этому полю. Поскольку пульсации магнитной проницаемости вблизи точки Кюри имеют значительную глубину модуляции, то ФИП с тепловым способом возбуждения имеет более высокую чувствительность, чем с механическим, и может использоваться для измерения слабых магнитных полей [17]. Однако для таких ФИП требуются материалы со специфическими свойствами, что усложняет их изготовление но и обуславливает значительную зависимость точности их работы от внешних условий.

ФИП третьего типа с *магнитным возбуждением*, которые получили название «феррозонд», реализуют нелинейную зависимость  $\mu = f(H)$ , характерную для ферромагнитных материалов. Конструктивно они содержат стержень из магнитоякого ферромагнитного материала, на котором расположена катушка возбуждения, обеспечивающая периодические изменения его магнитной проницаемости.

Изменяющийся магнитный поток наводит в измерительной катушке ЭДС, причем в случае отсутствия внешнего измеряемого поля ЭДС будет изменяться по гармоническому закону, а при его появлении величина и гармонический состав ЭДС изменится и появятся четные гармоники с величиной, прямо пропорциональной напряженности измеряемого поля. За счет

этого на выводах измерительной катушки появляется информационный сигнал в виде напряжения, который содержит целый комплекс данных об измеряемом магнитном поле: амплитуду, частоту и направление действия вектора напряженности. Именно эти свойства являются преимуществом феррозондов по сравнению с ФИП, использующими другие способы возбуждения.

Для всех трех типов ФИП в соответствии с законом электромагнитной индукции для ЭДС, индуцированной в измерительной обмотке, справедливо уравнение [1, 18]:

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= -w s_i \dot{\mathbf{i}}_w^0 \frac{d}{dt} \mathbf{B}(t) = \\ &= -w s_i \dot{\mathbf{i}}_w^0 \frac{d}{dt} [\hat{\boldsymbol{\mu}}^*(t) \mathbf{H}_0], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\dot{\mathbf{i}}_w^0$  – единичный вектор, совпадающий с плоскостью витков обмотки;  $w$  – число витков измерительной обмотки;  $s_i$  – площадь поперечного сечения сердечника в направлении  $\dot{\mathbf{i}}_w^0$ ;  $\hat{\boldsymbol{\mu}}^*(t)$  – тензор относительной магнитной проницаемости материала сердечника;  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}_0$  – векторы индукции и напряженности измеряемого магнитного поля.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предлагается *ФИП* с новым способом мультифакторного возбуждения, основанном на электромагнитно-акустическом и магнитомодуляционном эффектах. Вариант конструктивного решения нового типа феррозондового датчика представлен на **рис. 1, а**.

Полуэлементы 1 и 2 ФД изготовлены из электропроводящего феррита, например марганецникельного, с удельным электрическим сопротивлением  $\rho \leq 50$  Ом·см. Электрод 8 выполнен из электропроводящего материала (медь, алюминий и т.п.) в виде тонкостенной цилиндрической трубки с продольной прорезью по всей ее длине (**рис 1, б**) и является общим элементом возбуждения для ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>. Особенностью данного типа ФД является применение в качестве сигнальных выходов ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> (относительно «корпуса») разноименных выводов их электрических обмоток, что, в свою очередь, является одним из основных условий для нормального функционирования рассматриваемого варианта ФД.

Следует отметить, что продольный разрез боковой поверхности цилиндрического электрода 8 по всей его длине предотвращает эффект возможной экранировки первого и второго полуэлементов ФД от воздействия переменного возбуждающего магнитного поля. Иными словами, данная особенность конструктивного исполнения цилиндрического электрода 8 препятствует индуктированию в нем вихревых токов Фуко, наличие которых могло бы привести к возникновению паразитного вторичного переменного магнитного поля, нарушающего нормальный режим функционирования ФД.

Если рассматривать магнитную проницаемость  $\mu$  в качестве частного параметра материала полуэлементов ФД, на который оказывается несколько воздействий, то в этом случае основным воздействием можно считать магнитное поле возбуждения, а дополнительным – акустическое поле, являющееся проявлением ЭМА-эффекта.

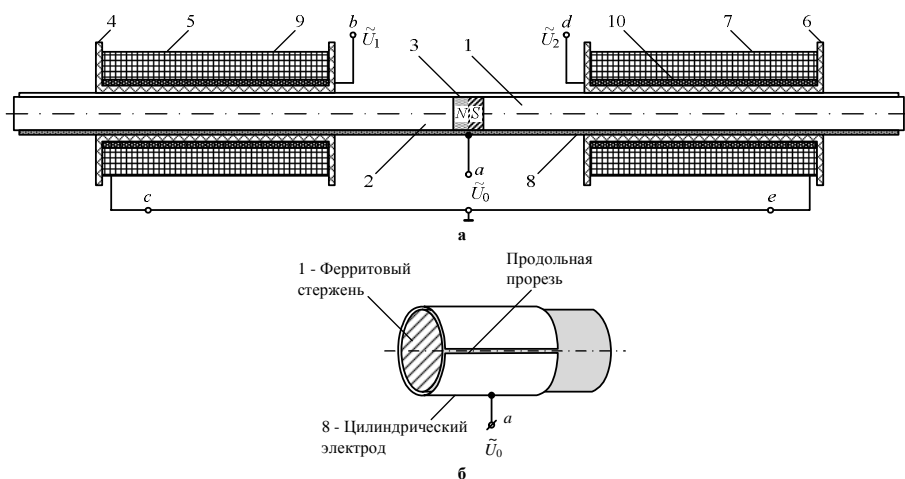


Рис. 1. Вариант конструктивного решения ФД (а) и его функциональных элементов (б):

1 и 2 – первый и второй полуэлементы (структурные элементы) ФД; 3 – постоянный магнит ПМ; 4 и 6 – диэлектрические каркасы соответственно первой и второй измерительных катушек (ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>); 5 и 7 – электрические обмотки соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>; 8 – цилиндрический электрод (ЦЭ); 9 и 10 – первые нижние ряды проволочных обмоток соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>; «а» – клемма подключения напряжения возбуждения  $U_0$  относительно «корпуса»; «б» и «с» – клеммы подключения выходных сигналов соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> относительно «корпуса»

Предлагаемый вариант ФД является по существу параметрическим модулятором, где модуляция измеряемой величины (постоянное магнитное поле) осуществляется за счет двухфакторного воздействия на частный параметр.

Рассматриваемый вариант ФД, как и любой другой технический объект, представляет собой сложную иерархическую систему, характеризующуюся множеством структурных элементов и связями между ними. Функционирование подобной системы основывается на проявлении множества взаимосвязанных физических эффектов, совокупность которых фактически является физической схемой ФД. Обобщенная физическая схема, лежащая в основе функционирования предлагаемого ФД, представлена на рис. 2. Данная физическая схема ФД дает полное представление о том, какие заданные входные параметры преобразуются в заданные выходные параметры, то есть отражает рабочую функцию ФД, а схемы отдельных физических эффектов раскрывают физическую основу ФД и показывают функциональные взаимосвязи между его структурными элементами.

Для большего понимания сути предлагаемого технического решения более подробно рассмотрим используемый эффект ЭМА-преобразования. Установлено, что в широком диапазоне частот, магнитных полей и температур прослеживаются различные механизмы бесконтактного преобразования электромагнитных и звуковых волн на границе металлических материалов, объединяемые общим понятием ЭМА-преобразования [19]. Суть подобного преобразования состоит в том, что в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни магнитоstrictionными свойствами, под действием падающей электромагнитной волны возбуждаются

ультразвуковые волны той же или кратной частоты.

Следует подчеркнуть, что принципиальное значение имеет наличие границы раздела сред, как места сосредоточения источника возбуждения. При этом в преобразовании участвуют подсистемы ферромагнетика различной физической природы: электрическая, магнитная, магнитоупругая и упругая. Этим объясняется чувствительность ЭМА-преобразования к различным изменениям, происходящим в исследуемых образцах.

Воспользуемся резонансной методикой ЭМА-преобразования, при которой используются образцы простой формы (например, цилиндры), в которых с помощью проходных катушек в режиме непрерывной генерации устанавливаются резонансы стоячих волн, а подмагничивающее поле создается постоянным магнитом [20].

Основными параметрами резонансного ЭМА-преобразования, несущими информацию о структурных изменениях и о напряженно-деформированном состоянии, являются:

- 1 – амплитуда принятого сигнала после двойного преобразования, прямо пропорциональная динамической магнитострикции;
- 2 – частота акустического резонанса, прямо пропорциональная скорости;
- 3 – акустическая добротность.

Прямым ЭМА-преобразованием принято считать преобразование электромагнитных волн в упругие колебания, а обратным явлением будет преобразование упругих волн в электромагнитные волны. Причем преобразование «электромагнитное поле – упругие колебания – электромагнитное поле» можно считать двойным ЭМА-преобразованием [21].

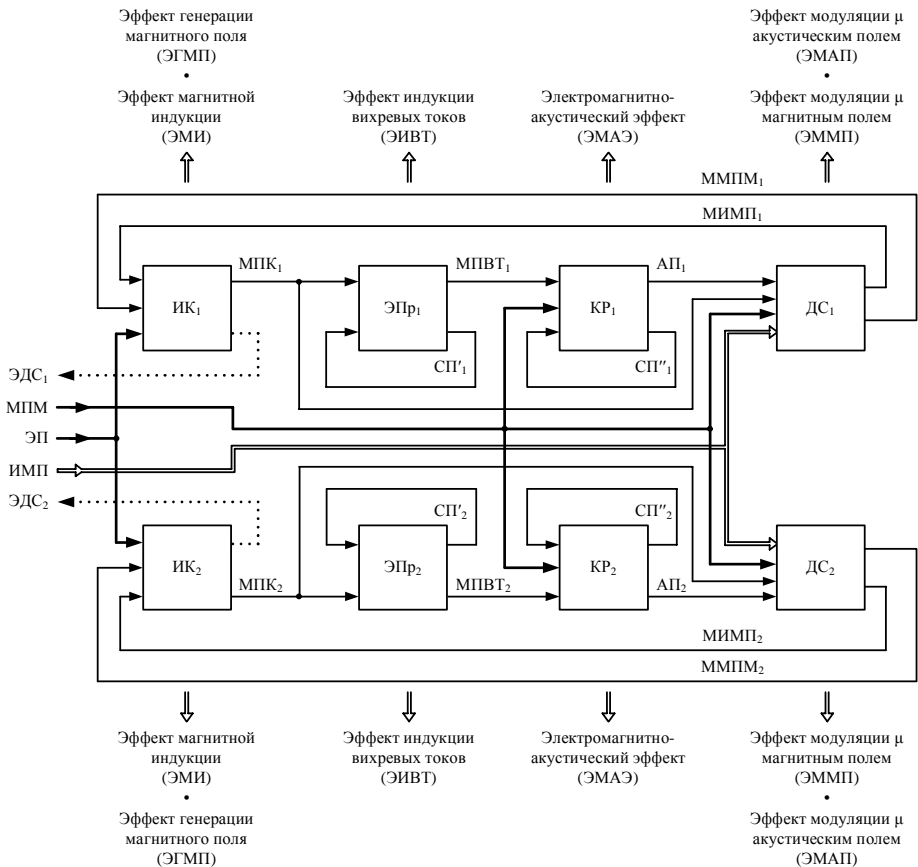


Рис. 2. Физическая схема ФД:

ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> – измерительные катушки соответственно первого и второго полуэлементов ФД; ЭПР<sub>1</sub> и ЭПР<sub>2</sub> – электроны проводимости ферритов соответственно первого и второго полуэлементов ФД; КР<sub>1</sub> и КР<sub>2</sub> – кристаллическая решетка материала соответственно первого и второго полуэлементов ФД; ДС<sub>1</sub> и ДС<sub>2</sub> – доменные системы материала соответственно первого и второго полуэлементов ФД; ЭДС<sub>1</sub> и ЭДС<sub>2</sub> – электродвижущие силы соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>; МПМ – магнитное поле постоянного магнита; ИМП – измеряемое постоянное магнитное поле; ЭП – переменное электрическое поле, создаваемое на ЦЭ разностью потенциалов между клеммой подключения напряжения возбуждения и «корпусом»; МПК<sub>1</sub> и МПК<sub>2</sub> – магнитные поля, индуцированные токами возбуждения ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> в соответствующих полуэлементах ФД; СП<sub>1</sub>, СП<sub>1</sub>' и СП<sub>2</sub>, СП<sub>2</sub>' – силовые поля разного уровня, проявляющиеся в качестве физических эффектов в кристаллических структурах соответственно первого и второго полуэлементов ФД; МПВТ<sub>1</sub> и МПВТ<sub>2</sub> – магнитные поля, создаваемые вихревыми токами соответственно в первом и втором полуэлементах ФД; АП<sub>1</sub> и АП<sub>2</sub> – акустические поля, возбуждаемые в кристаллических структурах соответственно первого и второго полуэлементов ФД

Обратный эффект, то есть прием акустических сигналов с помощью ЭМА-преобразования, осуществляется благодаря возникновению ЭДС в обмотке катушки, которая подвергается электромагнитным излучениям свободных электронов материала ферритовых сердечников ФС<sub>1</sub> и ФС<sub>2</sub> под действием акустических волн.

При этом в соответствии с теоремой взаимности акустические характеристики ЭМА-преобразователей при излучении и приеме оказываются идентичными. Например, избирательность волн и диаграммы направленности излучения ЭМА-преобразователей соответ-

ствуют таковым при их работе в качестве приемников.

Фактически в основе ЭМА-преобразования лежит явление взаимной трансформации упругих и электромагнитных полей.

Преобразование полей в твердых телах возможно за счет многих физических явлений, которые ответственны, например, за магнитострикцию, силу Лоренца, силу, обусловленную градиентом намагниченности. При этом уравнения электродинамики, описывающие силы Лоренца и намагничивание, вводятся и используются вместе со стандартной теорией упругости для

описания генерации и приема волн, а магнитострикция включается в модель с помощью соответствующих уравнений, которые связывают упругое поле с электромагнитным полем.

Обобщая, можно констатировать, что ЭМА-метод возбуждения и приема ультразвуковых колебаний основывается на трех эффектах взаимодействия электромагнитного поля с компонентами структуры материала объекта воздействия [22]:

1. Магнитострикция, представляющая собой физический эффект, при котором воздействие изменяющегося внешнего магнитного поля изменяет геометрические размеры ферромагнитных материалов. При этом обратный этому эффект принято считать магнитоупругостью.

2. Магнитное взаимодействие, возникающее, когда ферромагнитный материал и проводник с переменным электрическим током взаимно притягиваются и отталкиваются. Отталкивание и притяжение катушки приводят к обратному механическому воздействию на контролируемое изделие, в изделии возникают упругие колебания.

3. Электродинамическое взаимодействие, за счет которого в токопроводящем материале возбуждаются вихревые токи, которые взаимодействуют с постоянным магнитным полем и вызывают колебания, что, в свою очередь, приводит к возбуждению колебаний атомов, то есть кристаллической решетки материала (то есть появляются механические напряжения, которые приводят к возникновению упругих акустических колебаний).

В основе функционирования предлагаемого варианта ФД, определяемого прежде всего физическими свойствами самого материала полуэлементов магнитометра, лежит электродинамическое взаимодействие. В этом случае пондеромоторные силы, возникающие при взаимодействии вихревых токов с первичным полем, и магнитные пондеромоторные силы, возникающие при взаимодействии первичного поля с ферромагнитным веществом, направлены встречно и при некоторых значениях параметров уравниваются. Изменением геометрии ФД и частоты электромагнитного поля можно смещать нулевую точку пондеромоторного взаимодействия. При этом в преобразовании участвуют такие подсистемы ферромагнетика различной физической природы, как электрическая, магнитная, магнитоупругая и упругая, что в конечном счете и объясняет высокую чувствительность ЭМА-преобразования к различным изменениям, происходящим в материале ФС<sub>1</sub> и ФС<sub>2</sub>.

Особенностью представленного варианта ФД является наличие пяти совмещенных режимов функционирования: 1 – режим мостового индуктивно-емкостного делителя напряжения; 2 – режим ЭМА-преобразователя (эмикона), реализующего процесс возникновения пространственно-периодических акустических волн; 3 – режим μ-преобразования за счет ЭМА-эффекта; 4 – режим индуктора, при котором измерительные катушки ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>, помимо своего прямого назначения, дополнительно выполняют функции элементов формирования возбуждающего магнитного поля; 5 – режим μ-преобразования за счет магнитомодуляционного эффекта (ММЭ).

Рассмотрим в упрощенном виде основные особенности указанных режимов функционирования ФД:

1. Режим мостового индуктивно-емкостного делителя напряжения. Принципиальная электрическая схема замещения и включения рассматриваемого варианта ФД в рассматриваемом режиме функционирования представлены на рис. 3.

Для наглядности данный режим рассмотрим при условии  $H_0 = 0$ . В этом случае напряжение возбуждения  $u_0 = U_{0max} \sin \omega t$  (соответствующее комплексное значение  $\dot{U}_0$ ) подается на электрические обмотки ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> соответственно через  $C'_{cb}$  и  $C''_{cb}$ , которые также являются электрическими параметрами ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>, а выходные сигналы  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  снимаются с соответствующих входных концов электрических обмоток ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>.

Будем считать, что при симметричном расположении ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>  $R_1 = R_2 = R$ ;  $L_1 = L_2 = L$ ;  $C_1 = C_2 = C$ ;  $C'_{cb} = C''_{cb} = C_{cb}$ . Тогда с учетом того, что  $\dot{Z}_{11} = R + j\omega L_1$  и  $\dot{Z}_{21} = R_2 + j\omega L_2$  – комплексные сопротивления соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>;  $\dot{Z}_{12} = -j/(\omega C_1)$  и  $\dot{Z}_{22} = -j/(\omega C_2)$  – комплексное сопротивление межвитковых емкостей соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>;  $\dot{Z}_{13} = -j/(\omega C'_{cb})$  и  $\dot{Z}_{23} = -j/(\omega C''_{cb})$  – комплексные сопротивления конденсаторов связи соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> для рассматриваемого типа ФД, будем иметь:

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{21}; \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{22}; \dot{Z}_{13} = \dot{Z}_{23};$$

$$\omega = \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC_{cb}}}, \quad (2)$$

где  $C_{cb} = 0,56 \cdot l \ln(d_2/d_1)$ ;  $l$  – длина перекрываемой части обкладок конденсатора связи;  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно диаметры внутренней и внешней обкладок конденсатора связи.

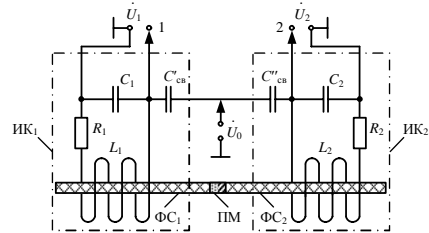


Рис. 3. Электрическая схема замещения и включения ФД для первого режима:

$\dot{U}_0$  – комплексная величина гармонического напряжения возбуждения измерительных катушек относительно «корпуса»; ФС<sub>1</sub> и ФС<sub>2</sub> – ферритовые сердечники полуэлементов ФД, на которые воздействует измеряемое магнитное поле напряженностью  $H_0$ ; ПМ – постоянный магнит, создающий продольное магнитное поле в ФС<sub>1</sub> и ФС<sub>2</sub> с индукцией  $B_{CM}$ ;  $C_1$  и  $C_2$  – межвитковые емкости обмоток соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>;  $R_1$  и  $R_2$  – активные сопротивления обмоток соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>;  $L_1$  и  $L_2$  – индуктивности обмоток соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>;  $C'_{cb}$  и  $C''_{cb}$  – конденсаторы связи соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>, которые конструктивно являются конденсаторами с паразитными емкостями, образованными медным цилиндрическим электродом с коаксиально внутри расположенными ФС<sub>1</sub> и ФС<sub>2</sub> и первыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>

С учетом сделанных замечаний для выходных синфазных сигналов  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  соответственно с выходных концов измерительных катушек ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> (индуктивные элементы мостового делителя напряжения) будет справедливо равенство  $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$ .

2. Режим ЭМА-преобразователя (эмикона). В этом режиме функционирования ФД протекающий через обмотку измерительных катушек ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> переменный электрический ток возбуждает на поверхности электропроводящего ферромагнетика вихревые токи, на которые при наличии статического магнитного поля соответствующей направленности воздействуют силы, передаваемые впоследствии на кристаллическую решетку через столкновения и другие взаимодействия. В качестве реакции на такие силы в структуре электропроводящего ферромагнетика возникает пространственно-периодические акустические волны.

3. Режим  $\mu$ -преобразования за счет ЭМА-эффекта. Принципиальная электрическая схема замещения и включения ФД для третьего режима функционирования представлена на рис. 4. В этом случае осуществляется механическое воздействие на доменную систему структуры материала сердечников полуэлементов ФД пространственно-периодическими акустическими волнами, фактически реализующими процесс модуляции магнитной проницаемости полуэлементов ФД. При этом следует отметить, что возникающие механические напряжения оказывают весьма значительное воздействие на состояние намагниченности. Поэтому при наличии измеряемого поля  $H_0$  возникают соответствующие вариации этого поля, которые индуцируют в измерительных катушках ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> соответствующие парафазные акустомодуляционные ЭДС  $\dot{E}_{1AM}$  и  $-\dot{E}_{2AM}$ .

Для совмещенных во времени первого, второго и третьего режимов функционирования ФД, сопровождаемых соответствующими физическими эффектами, для разностного значения между  $\dot{U}_{1\Sigma} = \dot{U}_1 + \dot{E}_{1AM}$  и  $\dot{U}_{2\Sigma} = \dot{U}_2 - \dot{E}_{2AM}$  можем записать:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\Sigma} &= \dot{U}_{1\Sigma} - \dot{U}_{2\Sigma} = (\dot{U}_1 + \dot{E}_{1AM}) - (\dot{U}_2 - \dot{E}_{2AM}) = \\ &= \dot{E}_{1AM} + \dot{E}_{2AM}. \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом того, что  $|\dot{E}_{1AM}| = |\dot{E}_{2AM}| = |\dot{E}_{AM}|$ , окончательно получим

$$\Delta \dot{U}_{\Sigma} = 2\dot{E}_{AM}. \quad (4)$$

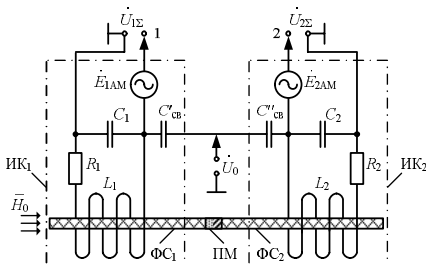


Рис. 4. Электрическая схема замещения и включения ФД для третьего режима

4. Режим индуктора, при котором протекающий через обмотки измерительных катушек ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> переменный электрический ток индуцирует в ферритовых сердечниках полуэлементов ФД вспомогательные магнитные поля (поля возбуждения).

5. Режим  $\mu$ -преобразования за счет ММЭ. Принципиальная электрическая схема замещения и включения ФД для этого режима функционирования представлена на рис. 5.

При данном режиме функционирования ФД индуцированные в ферритовых сердечниках полуэлементов ФД вспомогательные магнитные поля осуществляют процесс модуляции магнитной проницаемости этих ферритовых сердечников, который, в свою очередь, при наличии измеряемого поля  $H_0$  вызывает соответствующие вариации этого поля. При этом возникшие вариации измеряемого магнитного поля  $H_0$  индуцируют в измерительных катушках ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> соответствующие парафазные магнитомодуляционные ЭДС  $\dot{E}_{1MM}$  и  $-\dot{E}_{2MM}$ .

Для совмещенных во времени первого, четвертого и пятого режимов функционирования ФД, сопровождаемых соответствующими физическими эффектами, разностное значение между  $\dot{U}_{1\Sigma} = \dot{U}_1 + \dot{E}_{1MM}$  и  $\dot{U}_{2\Sigma} = \dot{U}_2 - \dot{E}_{2MM}$  определится следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\Sigma} &= \dot{U}_{1\Sigma} - \dot{U}_{2\Sigma} = \\ &= (\dot{U}_1 + \dot{E}_{1MM}) - (\dot{U}_2 - \dot{E}_{2MM}) = \dot{E}_{1MM} + \dot{E}_{2MM}. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом того, что  $|\dot{E}_{1MM}| = |\dot{E}_{2MM}| = |\dot{E}_{MM}|$ , окончательно получим

$$\Delta \dot{U}_{\Sigma} = 2\dot{E}_{MM}. \quad (6)$$

Для совмещенных во времени всех пяти режимов функционирования ФД можем записать выражение вида

$$\Delta \dot{U}_{\Sigma} \doteq 2(E_{1AM} + E_{2AM}). \quad (7)$$

Рассмотрим более подробно суть процесса взаимодействия первичного электромагнитного поля со вторичным и преобразование энергии электромагнитного поля в энергию акустического поля.

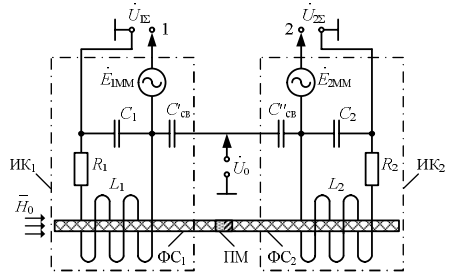


Рис. 5. Электрическая схема замещения и включения ФД для пятого режима

При размещении источника электромагнитного поля, например эмикона проходного типа, у поверхности произвольной электропроводящей среды в ней при наличии такого поля каждый электрон испытывает действие соответствующей силы, и все электроны, находящиеся внутри сферы Ферми, получают соответствующее ускорение в электропроводящей среде.

Такое направленное движение валентных электронов приводит к переносу заряда в твёрдом теле, то есть к электрическому вихревому току.

Следует отметить, что вихревые токи, наводимые в электропроводящей среде электромагнитным полем эмикона, отражают энергию обратно в эмикон, а распределение носителей заряда согласно классическому представлению, подчиняясь экспоненциальному закону, происходит от максимального поверхностного значения до минимального внутри электропроводящей среды, при этом с резкой частотной зависимостью. При этом электроны, движущиеся у поверхности электропроводящей среды и вносящие свой вклад в электрический вихревой ток, подвержены действию (силы Лоренца) магнитного поля эмикона, стремящегося отеснить электроны от поверхности.

В этом случае электронам легче изменить своё движение, если они находятся вблизи поверхности среды, по сравнению с электронами, находящимися в глубине этой среды. Поскольку носители всегда выбирают оптимальную траекторию (соответствующую условию минимальной энергии), то носители, образующие вихревой ток, под действием сил Лоренца перемещаются в глубь среды от поверхности, создавая зону у поверхности среды без носителей заряда. В этом случае само явление электромагнитной генерации звука в электропроводящих средах состоит в том, что переменное электромагнитное поле источника возбуждения взаимодействует с электронной системой электропроводящей среды, а возмущение электронов внешним электромагнитным воздействием, в свою очередь, приводит к движению упругой среды за счет взаимодействия электронов с решеткой и распространению возмущения в виде звуковых волн в глубь среды.

Особенности конструкции эмикона проходного типа представлены на рис. 6. Фактически на рис. 6 схематически показана конструкция и обособивается принцип действия проходного ЭМА-преобразователя радиальных продольных  $L$ -волн, где возбуждение продольных ультразвуковых волн осуществляется за счет электродинамического механизма.

Распространение преимущественно продольных волн достигается благодаря взаимной ориентации поля подмагничивания  $B_{CM}$ , направленного вдоль оси  $Z$ , и вихревых токов  $i_e$ , текущих по замкнутым контурам внешней поверхности соответственно  $\Phi C_1$  и  $\Phi C_2$  полуэлементов ФД. Для указанной конструкции проходного ЭМА-преобразователя характерно одновременное излучение упругих волн из каждой точки на поверхности  $\Phi C_1$  и  $\Phi C_2$  полуэлементов ФД, расположенной соответственно под ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>. Таким образом, волны распространяются во всех радиальных направлениях в поперечном сечении объекта.

Модели процесса распространения продольных  $L$ -волн по сечению цилиндра на плоскости и в трехмерной постановке представлены соответственно на рис. 7, а и рис. 7, б.

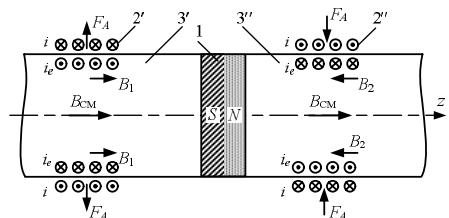


Рис. 6. Конструкция и принцип действия эмикона проходного типа:

1 – ПМ с осевой поляризацией (источник постоянного магнитного поля); 2' и 2'' – электрические обмотки соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>; 3' и 3'' – соответственно  $\Phi C_1$  и  $\Phi C_2$  полуэлементов ФД;  $B_1$  и  $B_2$  – индукции переменного магнитного поля (поле возбуждения эмикона), наводимые соответственно токами возбуждения ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> эмикона в материале  $\Phi C_1$  и  $\Phi C_2$  полуэлементов ФД

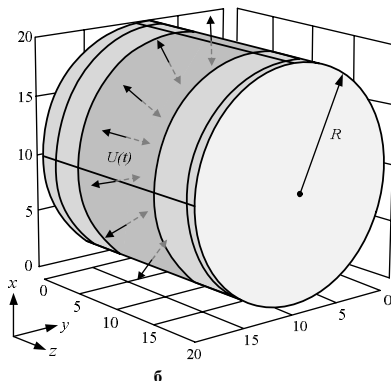
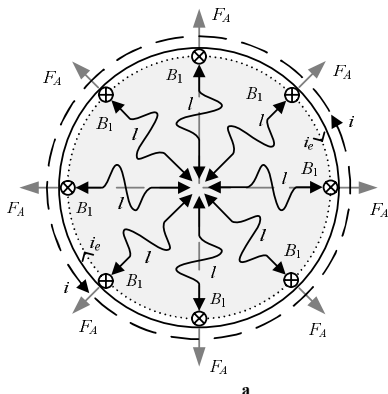


Рис. 7. Модели процесса распространения радиальных продольных  $L$ -волн по сечению цилиндра на плоскости (а) и в трехмерной постановке (б), мм

Преимущественное возбуждение одного типа волн определяется взаимной ориентацией поля подмагничивания с индукцией  $B_{CM}$  и вихревых токов  $i_e$ , текущих по периметру ферритовых стержней. Изменение линейных или объемных размеров элементарного объема под действием электромагнитного поля обусловлено магнитоэстроционным взаимодействием.

Взаимодействие вихревых токов с индукцией поля подмагничивания  $B_{CM}$ , приводящее к появлению  $F_A$  (сила Ампера), обусловлено возникновением акустических колебаний при электродинамическом механизме [23, 24]:

$$F_A = i_e B_{CM} dl, \quad (8)$$

где  $i_e$  – вихревой ток участка длиной  $dl$ .

Упругие силы возникают в приповерхностном слое объекта контроля, определяемом глубиной скин-слоя  $\delta$ :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu \sigma}}, \quad (9)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $\omega$  – круговая частота колебаний;  $\sigma$  – электропроводность.

При подаче электрического напряжения высокой частоты  $u_0(t) = U_{0m} \cos \omega_p t$  на цилиндрический электрод 8 (см. рис. 1) конденсатора связи  $C_{св}$  в режиме последовательного резонанса ИК<sub>1</sub> ток через нее определится выражением

$$I_1(t) = \frac{u_0(t)}{R_1}. \quad (10)$$

Тогда напряженность переменного магнитного поля, создаваемую током возбуждения ИК<sub>1</sub>, можно формализовать в следующем виде [25, 26]:

$$H_1(t) = \frac{2\sqrt{2}w_1 U_{0m} \cos \omega_p t}{l_1 R_1} = H_{1m} \cos \omega_p t, \quad (11)$$

где  $H_{1m} = 2\sqrt{2}w_1 U_{0m} / (l_1 R_1)$  – амплитуда напряженности магнитного поля, создаваемая током ИК<sub>1</sub>.

В случае возбуждения как продольной, так и поперечной плоских монохроматических акустических волн уравнение вынужденных акустических колебаний, распространяющихся от границы раздела, может быть записано в виде [27, 28]

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho c} [\mathbf{j} \mathbf{H}_{CM}], \quad (12)$$

где  $\mathbf{H}_{CM}$  – векторная величина напряженности постоянного магнитного поля (магнитное поле ПМ);  $\mathbf{j}$  – векторная величина плотности переменного тока в скин-слое;  $\xi$  – вектор смещения;  $v$  – скорость акустической волны в материале ферритового стержня;  $\rho$  – удельная плотность материала ферритового стержня;  $c$  – скорость света.

Полагая, что переменное магнитное поле (поле

возбуждения эмикона) изменяется по закону  $\exp[i(\omega t - kz)]$ , для плотности переменного тока в скин-слое можем записать:

$$\mathbf{j}(z, t) = \frac{(1+i)c}{4\pi\delta} H_{1m} \exp\left[-(1+i)\frac{z}{\delta}\right] e^{i\omega t}, \quad (13)$$

где  $H_{1m}$  – амплитуда переменного магнитного поля;  $\delta = c\sqrt{2\pi\omega\sigma}$ ;  $\sigma$  – проводимость металла;  $\omega$  – циклическая частота.

На расстояниях, превышающих мощность скин-слоя, и с учетом (11) решение уравнения (12) примет вид

$$\xi_m = \frac{H_{CM} H_{1m}}{4\pi\rho v \omega} \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}, \quad (14)$$

где  $\beta = q^2 \delta^2 / 2$ ;  $q = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина акустической волны.

Тогда для эффективности преобразования, определяемой отношением потоков энергии в упругой ( $\rho \cdot v \cdot \omega^2 \cdot \xi^2$ ) и электромагнитных ( $\omega \delta \cdot H_m^2 / 16\pi$ ) волнах на поверхности ферритового стержня, будет справедливо выражение вида

$$\tau = \frac{H_{CM} H_{1m}}{2\pi\rho v \omega \delta} \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}. \quad (15)$$

В отношении режима  $\mu$ -преобразования за счет ММЭ можно констатировать, что он, по своей сути, фактически является режимом функционирования феррозонда с продольным возбуждением. Поэтому в соответствии с существующей параметрической теорией феррозондов с продольным возбуждением, где используется разложение функции  $B(H_2)$  при  $H_2 = H_1 + H_0$  в ряд Тейлора по малому воздействию, можем записать

$$B_0(t) = 2\mu_0 \mu^* [H_1(t)] H_0(t). \quad (16)$$

Следует отметить, что при заданной амплитуде поля возбуждения функция  $\mu^* [H_1(t)]$  может рассматриваться как функция времени  $\mu^*(t)$ .

С учетом совместного модулирующего воздействия акустического и переменного магнитного полей на магнитную проницаемость материала  $\Phi C_1$  и  $\Phi C_2$  запишем следующее выражение:

$$\mu^* = F[\xi(t); H_1(t)].$$

Следует отметить, что для рассматриваемых физических процессов под модуляцией понимается изменение состояния параметра магнитной проницаемости материала  $\Phi C_1$  и  $\Phi C_2$  при воздействии физических полей.

Тогда в соответствии со сделанными замечаниями можем записать:

$$\mu^*(t) = \mu_p [1 + (m_{MM} + m_{AM}) \cos \omega_p t], \quad (17)$$

где  $m_{AM} = \eta_{AM} \xi_m \mu_p^{-1}$  и  $m_{MM} = \eta_{MM} H_{1m} \mu_p^{-1}$  – глубина соответственно акустической и магнитной модуляции;  $\eta_{AM}$  и  $\eta_{MM}$  – коэффициенты соответственно акустомангнит-

ного и магнитомодуляционного преобразований;  $\omega_p$  – циклическая частота возбуждения процессов преобразования на совпадающих частотах электромеханического и магнитного резонансов.

Из выражения (16) и (17) следует, что измеряемое постоянное магнитное поле  $H_0(t)$ , направленное аксиально к ФС<sub>1</sub> и ФС<sub>2</sub>, за счет параметрической модуляции осциллирующей магнитной проницаемостью ферромагнитного материала ФС<sub>1</sub> и ФС<sub>2</sub> трансформируется в переменное магнитное поле с соответствующей индукцией:

$$B_0(t) = 2\mu_0\mu^*(t)H_0(t). \quad (18)$$

Вариации измеряемого магнитного поля, вызванные уже модулирующими процессами магнитной проницаемости, воздействуют на обмотки ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>, индуцируя в них соответствующие ЭДС:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= -s_1w_1 \frac{dB_0(t)}{dt}; \\ e_2(t) &= -s_2w_2 \frac{dB_0(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (19)$$

Подставляя (18) в (19), для каждой из измерительных катушек получим:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= -2s_1w_1\mu_0 \left[ \mu^*(t) \frac{dH_0}{dt} + H_0(t) \frac{d\mu^*}{dt} \right] = \\ &= -2s_1w_1\mu_0 H_0 \frac{d\mu^*}{dt} = \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} &= 2s_1w_1\mu_0\mu_p \omega_p H_0 (m_{MM} + m_{AM}) \sin \omega_p t = \\ &= 2s_1w_1\mu_0\omega_p H_0 (\eta_{AM}\zeta_m + \eta_{MM}H_{1m}) \sin \omega_p t; \end{aligned}$$

– для ИК<sub>2</sub>

$$\begin{aligned} e_2(t) &= -2s_2w_2\mu_0 \left[ \mu^*(t) \frac{dH_0}{dt} + H_0(t) \frac{d\mu^*}{dt} \right] = \\ &= -2s_2w_2\mu_0 H_0 \frac{d\mu^*}{dt} = \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} &= 2s_2w_2\mu_0\omega_p H_0 (m_{MM} + m_{AM}) \sin \omega_p t = \\ &= 2s_2w_2\mu_0\omega_p H_0 (\eta_{AM}\zeta_m + \eta_{MM}H_{1m}) \sin \omega_p t. \end{aligned}$$

Обобщая, и в соответствии с (6) для разностного сигнала с выхода ФД можем записать:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\Sigma}(t) &= 4sw\mu_0\omega_p H_0 \times \\ &\times (\eta_{AM} \cdot \zeta_m + \eta_{MM} \cdot H_{1m}) \sin \omega_p t, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $s = s_1 = s_2$ ;  $w = w_1 = w_2$ .

В полученном аналитическом выражении (22) видна четкая реализация принципа суперпозиции в виде аддитивного модулирующего воздействия от проявления двух основных физических эффектов, инициируемых соответствующими активизирующими физическими полями, что, в свою очередь, говорит о повышенной эффективности  $\mu$ -преобразования в целом.

Проведенный анализ возможных физических эффектов и приведенные аналитические выражения (13), (15)–(17) и (21) доказывают состоятельность предложенных идей, реализуемых в формате рассматриваемого технического решения и определяющих конструктивные особенности его практической реализации.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая, можно констатировать, что по сравнению с классическим вариантом феррозонда с магнитным возбуждением предлагаемый способ возбуждения, основанный на мультифакторном режиме возбуждения, обладает следующими преимуществами:

1. Существенное конструктивное упрощение, которое связано с тем, что ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> совмещают такие две функции, как генерация переменного магнитного поля возбуждения и регистрация информационного сигнала.

2. Повышенная помехозащищенность за счет использования ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> в качестве плечевых элементов емкостно-индуктивного измерительного моста с разностным сигналом его измерительной диагонали (компенсация синфазных составляющих помехи и последствий температурного дрейфа).

3. Повышенная чувствительность без ухудшения точности преобразования, которая обеспечивается путем использования набора свойств структурных элементов материала ФС<sub>1</sub> и ФС<sub>2</sub> полуэлементов ФД, проявляемых в виде различных физических эффектов при резонансном воздействии соответствующими физическими полями.

4. Пониженное энергопотребление.

Наличие перечисленных выше признаков, обуславливающих преимущества предлагаемого варианта ФД по сравнению с существующими прототипами, говорит о реальных перспективах его самого широкого промышленного применения для решения различных задач контроля, диагностики и точного позиционирования.

Следует отметить, что конкретное численное сравнение возможностей предлагаемого способа с известными выходит за рамки данной статьи и является предметом дальнейших опытно-конструкторских работ. Здесь же ставилась задача показать и обосновать принципиально новые признаки мультифакторного способа возбуждения феррозондов, основанного на совместном использовании электромагнитно-акустического и магнитомодуляционного эффектов. При этом возможность реализации предложенного способа была экспериментально проверена на физической модели ФД.

Таким образом, на основе предлагаемого нового способа возбуждения феррозонда и варианта его технического осуществления открываются реальные перспективы для более детальных исследований в области прикладного комплексного использования различных видов  $\mu$ -преобразования разработчиками магнитометрической аппаратуры, результаты которых могут найти свое эффективное применение при создании различных вариантов феррозондов на новых физических принципах функционирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Средства измерений параметров магнитного поля / Афанасьев Ю.В., Стуленцов Н.В., Хореев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Л.: Энергия, 1979. 320 с.
2. Ripka P. Magnetic Sensors and Magnetometers. Boston: Artech house, 2000. 494 p.
3. Щербаков Г.Н., Анцеливич М.А. Новые методы обнаружения скрытых объектов: борьба с терроризмом, гуманитарное разминирование, защита информации, контроль подземных коммуникаций, археология, экология. М.: Эльф ИПР, 2011. 503 с.
4. Толмачев И.И. Магнитные методы контроля и диагностики. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 216 с.
5. Голев И.М., Никитина Е.А. Технические аспекты измерения магнитного поля Земли для решения задач воздушной навигации // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 1. С. 273-279.
6. Трехкоординатный индукционный датчик переменного магнитного поля для магнитометрических систем локальной навигации / И.М. Голев, Т.И. Заенцева, Е.А. Никитина, И.О. Бакланов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 12. С. 91-99.
7. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. М.: ДМК Пресс, 2002. Т.2. 691 с.
8. Lenz J.E., Edelstein A.S., Magnetic Sensors and Their Applications // IEEE Sensors Journal. 2006. No. 3(6). Pp. 631-649. doi: 10.1109/JSEN.2006.874493
9. Tumanski S. Modern magnetic field sensors – a review // Przeglad Elektrotechniczn. 2013. No. 89(10). Pp. 1-12.
10. Ripka P. Advances in Magnetic Field Sensors // IEEE Sensors Journal. 2010. No. 6(10). Pp. 1108-1116. doi:10.1109/JSEN.2010.2043429
11. Брякин И.В. Магнитодинамический магнитометр для задач дефектоскопии // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 3(144). С. 35-41.
12. Брякин И.В. Магнитометр с тестовым алгоритмом функционирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. 18(1), С. 49-56. doi: 10.17587/mau.18.49-56
13. Can H., Topal U. Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism March. 2015. No. 3(28). Pp. 1093-1096. doi: 10.1007/s10948-014-2788-5
14. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin R.R. Two-Axis Fluxgate Magnetometer with a New Principle of Excitation // International Russian Automation Conference (RusAuto-Con). IEEE, 2020. Pp. 693-698. doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208228
15. Bochkarev I.V., Bryakin I.V., Khramshin V.R. Ferroprobe Magnetometer with Preset Excitation Field Induction Mode // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) IEEE, 2021. Pp. 31-36. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559463
16. Пат. 2768528 Российская Федерация, МПК G 01 V 3/00. Способ возбуждения феррозондов и устройство модулятора для его реализации / Брякин И.В., Бочкарев И.В.; заявитель ГОУ ВПО «Кыргызско-Российский Славянский университет». № 2020133609, заявл. 12.10.2020, опубл. 24.03.2022.
17. Магнитные измерения / Гуржин С.Г., Жулев В.И., Лукьянов Ю.А., Никитин С.В. Рязань: РГРТУ, 2006. 72 с.
18. Брякин И.В., Денисов Г.С. Феррозондовый датчик с упругим возбуждением сердечника // Проблемы автоматизации и управления. 2017. №1(32). С. 50-59.
19. Сазонов Ю.И. Волновые электромагнитно-акустические явления в конденсированных средах. М.: Физматлит, 2007. 340 с.
20. Новацкий В. Электромагнитные эффекты в твердых телах. М.: Мир, 1986. 157 с.
21. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания. М.: Физматлит, 2005. 292 с.
22. Сазонов Ю.И. Гидроакустические эмиссии с активной диафрагмой // Прикладная математика и техническая физика. 2000. №2. С. 41-43.
23. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники. СПб.: Корона Принт, 2004. 368 с.
24. Аполлонский С.М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. СПб.: Лань, 2018. 592 с.
25. Шенберг Д. Магнитные осцилляции в металлах. М.: Мир, 1986. 680 с.
26. Филиппов Б.Н., Танкеев А.П. Динамические эффекты в ферромагнетиках с доменной структурой. М.: Наука, 1987. 215 с.
27. Петришев О.Н. Ультразвуковые магнитострикционные волноводные системы. К.: Изд-во Киев. ун-та, 1989. 132 с.
28. Гурбатов С.И., Руденко О.В., Саичев А.И. Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. М.: Физматлит, 2008. 496 с.

Поступила в редакцию 06 февраля 2023 г.

Принята к печати 06 марта 2023 г.

**INFORMATION IN ENGLISH**

**FERROPROBE WITH MULTIFACTOR EXCITATION MODE**

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Information and Measuring System Laboratory, Institute of Mechanical Engineering and Automation, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic, bivass2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Department of Electrical Engineering, Power Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, elmech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Excitation systems of known ferro-induction converters (FIC) are considered. A variant of the FIC with a new excitation method based on electromagnetic-acoustic (EMA) and magneto-modulation (MME) effects is proposed. A variant of a constructive solution for a fluxgate sensor that implements the proposed excitation method is described. The physical processes underlying this technical solution are considered in detail. It is shown that in the proposed sensor, five operating modes are simultaneously implemented, accompanied by the corresponding

physical effects: 1) the mode of a bridge inductive-capacitive voltage divider; 2) the mode of the EMA transducer, which implements the emergence process of spatially periodic acoustic waves; 3)  $\mu$ -transformation mode due to the EMA effect; 4) inductor mode, in which the measuring coils, in addition to their direct purpose, additionally perform the functions of elements for generating an exciting magnetic field; 5)  $\mu$ -transformation mode due to MME. The analysis of the emerging physical effects and their analytical description showed that the proposed multifactor

excitation mode has the following advantages: 1) significant design simplification due to the fact that the measuring coils combine such functions as alternating magnetic field excitation and information signal recording; 2) increased noise immunity due to making use of measuring coils as upper arms of the inductive-capacitance measuring bridge with the difference signal of its measuring diagonal, which provides in-phase component noise compensation and the temperature drift consequences compensation; 3) hypersensitivity without deterioration in conversion accuracy due to making use of different physical effects during resonance action of corresponding physical fields; 4) lower power consumption.

**Keywords:** ferro-induction transducer, flux-gate sensor, electromagnetic field, electromagnetic-acoustic effect, acoustic waves, alternating magnetic field strength, eddy currents, magnetic permeability modulation

REFERENCES

1. Afanasiev Yu.V., Studentov N.V., Khoreev V.N. *Sredstva izmereniy parametrov magnitnoy polya* [Means of measuring the parameters of the magnetic field]. Leningrad, Energy Publ., 1979. 320 p. (In Russian)
2. Ripka, P. *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Boston, Artech house, 2000. 494 p.
3. Shcherbakov G. N., Antselevich M. A. *Novye metody obrabotki informatsii skrytykh ob'ektov: borba s terrorizmom, gumanitarnoe razminirovanie, zashchita informatsii, kontrol podzemnykh kommunikatsiy, arheologiya, ekologiya* [New methods of detecting hidden objects: the fight against terrorism, humanitarian demining, information protection, control of underground utilities, archeology, ecology]. Moscow, Elf IPR Publ., 2011. 503 p. (In Russian)
4. Tolmachev I.I. *Magnitnye metody kontrolya i diagnostiki* [Magnetic methods of control and diagnostics]. Tomsk, TPU Publishing House, 2008. 216 p. (In Russian)
5. Golev I.M., Nikitina E.A. Technical aspects of measuring the earth's magnetic field for solving problems of air navigation. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* [Aerospace Forces. Theory and Practice], 2017, no. 1, pp. 273-277. (In Russian)
6. Golev I.M., Zaentseva T.I., Nikitina E.A., Baklanov I.O. Three-coordinate inductive alternating magnetic field sensor for magnetometric systems of local navigation. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* [Aerospace Forces. Theory and Practice], 2019, no. 12, pp. 91-99. (In Russian)
7. Baranochnikov M.L. *Mikromagnitoelektronika* [Micromagneto-electronics. Moscow, DMK Press Publ., 2002, vol. 2, 691 p. (In Russian)
8. Lenz J. E., Edelstein A. S., *Magnetic Sensors and Their Applications*. IEEE Sensors Journal, 2006, vol. 6, no. 3, pp. 631-649. doi: 10.1109/JSEN.2006.874493
9. Tumanski S. Modern magnetic field sensors - a review. *Przeglad Elektrotechnicz.* 2013, no. 89(10), pp. 1-12.
10. Ripka P. Advances in Magnetic Field Sensors. *IEEE Sensors journal*, 2010, vol. 10, no. 6, pp. 1108-1116. doi: 10.1109/JSEN.2010.2043429.
11. Bryakin I.V. Magnetodynamic magnetometer for flaw detection problems. *Mechatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie], 2013, no. 3(144), pp. 35-41. (In Russian)
12. Bryakin I.V. Magnetometer with test operation algorithm. *Mechatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie], 2017, 18(1), pp. 49-56. (In Russian) doi: 10.17587/mau.18.49-56

13. Hava Can, Uğur Topal. Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2015, vol. 28, no. 3, pp.1093-1096. doi: 10.1007/s10948-014-2788-5
14. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin R.R. Two-Axis Fluxgate Magnetometer with a New Principle of Excitation. *International Russian Automation Conference (RusAuto-Con)*. IEEE, 2020, pp. 693-698. doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208228
15. Bochkarev I. V., Bryakin I. V., Khramshin V. R. Ferroprobe Magnetometer with Preset Excitation Field Induction Mode. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)* IEEE, 2021, pp. 31-36. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559463
16. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. *Sposob vozbuzhdeniya ferrozondov i ustroystvo modulyatora dlya ego realizatsii* [The method of excitation of ferroprobes and the device of the modulator for its implementation]. Patent RF, no. 2768528, 2022.
17. Gurzhin S.G., Zhulev V.I., Lukyanov Yu.A., Nikitin S.V. *Magnitnye izmereniya* [Magnetic measurements]. Ryazan, RGRU Publ., 2006. 72 p. (In Russian)
18. Bryakin I.V., Denisov G.S. Ferroprobe sensor with elastic excitation of the core. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Automation and control problems], 2017, no. 1(32), pp. 50-59. (In Russian)
19. Sazonov Yu.I. *Volnovye elektromagnitno-akusticheskie yavleniya v kondensirovannykh sredakh* [Wave electromagnetic-acoustic phenomena in condensed media]. Moscow, Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 2007. 340 p. (In Russian)
20. Novatsky V. *Elektromagnitnye efekty v tverdykh telakh* [Electromagnetic effects in solids]. Moscow, Mir Publ., 1986. 157 p. (In Russian)
21. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Ryskin N.M. *Nelineynye kolebaniya* [Nonlinear fluctuations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 292 p. (In Russian)
22. Sazonov Yu.I. Hydroacoustic emicons with an active diaphragm. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 2000, no. 2, pp. 41-43. (In Russian)
23. Pryanishnikov V.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. St. Petersburg, KORONA print Publ., 2004. 368 p. (In Russian)
24. Apollonsky S.M. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field]. St. Petersburg, Lan Publ., 2018. 592 p. (In Russian)
25. Shenberg D. *Magnitnye ostillyatsii v metallakh* [Magnetic oscillations in metals]. Moscow, Mir Publ., 1986. 680 p. (In Russian)
26. Filippov B.N., Tankeev A.P. *Dinamicheskie efekty v ferromagnitnykh s domennoy strukturou* [Dynamic effects in ferromagnets with a domain structure]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 215 p. (In Russian)
27. Petrishchev O. N. *Ul'trazvukovye magnitostriktionnye volnovodnye sistemy* [Ultrasonic magnetostrictive waveguide systems]. Kyiv, Kyiv University Publ., 1989. 132 p. (In Russian)
28. Gurbatov S.I., Rudenko O.V., Saichev A.I. *Volny i struktury v nelineynykh sredakh bez dispersii* [Waves and structures in non-linear media without dispersion]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 496 p. (In Russian)

Брякин И.В., Бочкарев И.В. Феррозонд с мультифакторным режимом возбуждения // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 73-83. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-73-83](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-73-83)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Ferroprobe with Multifactor Excitation Mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 73-83. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-73-83](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-73-83)