

УДК 620.179

И.В. Брякин, E-mail: bivas2006@yandex.ru

Институт автоматики и информационных технологий НАН КР;

Г.С. Денисов, E-mail: dengs@list.ru

Кыргызско-Российский Славянский университет

Бишкек, Кыргызстан

ФЕРРОЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК С УПРУГИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СЕРДЕЧНИКА

Рассматриваются особенности проявления различных физических эффектов в упорядочены магнетиках при воздействии акустических волн. Обосновывается новый способ возбуждения сердечника феррозондового датчика с использованием явления индуцированной модуляции магнитной проницаемости его структуры. Предлагается структурная блок-схема физического эффекта и вариант конструктивного решения модулятора для реализации нового способа возбуждения чувствительных элементов феррозондовых датчиков.

Ключевые слова: акустическая волна, акустомагнитоэлектрический эффект, доменные сегменты, индуцированные домены, магнитное и электрическое поля, модулятор, пьезоэлемент, способ возбуждения, упорядоченный магнетик, феррозондовый датчик,

Введение

Известно, что Земля, как космическое тело определенного внутреннего строения, генерирует постоянное магнитное поле, называемое нормальным или первичным. Многие горные породы и руды обладают магнитными свойствами и способны под воздействием этого поля приобретать намагниченность и создавать аномальные, или вторичные, магнитные поля. Следует отметить, что подобные аномалии магнитного поля, традиционно изучаемые одним из самых популярных методов разведочной геофизики – магниторазведкой, несут важнейшую информацию о распределении индуктивной и естественной остаточной намагниченностей горных пород и руд. При этом основной вклад в создание аномалий магнитного поля вносят ферромагнитные минералы и содержащие их горные породы. Выделение этих аномальных полей из наблюдаемого, или суммарного, геомагнитного поля (ГМП), а также их геологическое истолкование являются целью магниторазведки [1].

ГМП на земной поверхности описывается пространственно-временным распределением вектора индукции \mathbf{T} , где пространственная структура ГМП является распределением на поверхности Земли вектора \mathbf{T} в фиксированный момент времени, а временную структуру составляют вековые вариации главного поля и внешнее поле, которое не рассматривается вне временной зависимости. Для изучения пространственно-временной структуры такого ГМП нужны векторные измерения, реализуемые путем регистрации трех элементов вектора \mathbf{T} в системе координат «географический Север-Восток-Вертикаль вниз (С-В-Н)» [2].

Для решения подобной задачи в последнее время находят широкое применение трехкомпонентные магнитометры на основе феррозондовых датчиков (fluxgate) (ФД), каждый из которых имеет два параллельных соленоида с взаимно противоположным направлением обмоток и ферромагнитными сердечниками [3]. Соленоиды создают

противоположно направленные собственные магнитные поля. В охватывающей оба соленоида измерительной катушке генерируется ток, сила которого зависит от величины индукции измеряемого поля и от ориентации системы соленоидов относительно вектора индукции. Датчик имеет высокую чувствительность к индукции поля и его направлению.

В связи с тем, что в целом рассматриваемая магнитная восприимчивость горных пород изменяется в больших пределах (в миллионы раз), интенсивность аномалий магнитного поля варьирует от долей до сотен тысяч гамм ($1\gamma = 1\text{нТ}$). Учитывая данный фактор и возросшую в последнее время необходимость реализации именно прецизионных измерений, можно констатировать, что технические возможности традиционных ФД не в полной мере удовлетворяют возросшим требованиям к качественным показателям геомагнитных измерений.

Фактически, для регистрации аномальных магнитных полей на фоне ГМП необходима специальная аппаратура, имеющая и более высокую чувствительность, и существенно расширенный динамический диапазон измерений. Известные конструктивные и структурные методы повышения точности геомагнитных измерений в подавляющем своем большинстве достигли своего предела как в технологическом, так и в методологическом плане. Поэтому, перед разработчиками магнитометрической аппаратуры, в силу объективной необходимости, встает сложная задача создания датчиков, основанных на новых физических принципах, реализация которых позволит осуществить прецизионные измерения силовых или угловых элементов ГМП, существенно усовершенствовать магнитометрические приборы для навигации, дефектоскопии и для других технических приложений.

Анализ акустических эффектов в упорядоченных магнетиках

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть на основе метода феноменологической интерпретации широкий круг различных физических явлений в упорядоченных магнетиках, которыми являются стержневые ферромагнитные чувствительные элементы (ЧЭ) ФД.

Одним из функциональных элементов ФД является устройство модулятора (УМ), основным назначением которого можно считать формирование возбуждающего воздействия на ферромагнитную структуру ЧЭ переменным физическим полем, обычно магнитным или электрическим [4].

Определенный интерес при разработке нового принципа построения ФД вызывает исследование возможности использования физических эффектов от воздействия акустическим полем на структуру ЧЭ.

Известно, что акустические волны при распространении в пьезомагнитных материалах создают периодические колебания кристаллической решетки, сопровождающиеся определенными физическими эффектами: изменением модулей упругости, электрострикции, пьезоэлектрических и магнитоупругих модулей и т.п.

Можно предположить, что акустические волны могут также дополнительно индуцировать динамические доменные сегменты (ДС) в однородно упорядоченных магнетиках (ферромагнетики), в которых ширина доменов и доменных границ будет определяться длиной акустической волны и ее амплитудой. Такие «индуцированные домены», имеющие динамический характер, обладают возможностью пространственной или временной перестройки в зависимости от интенсивности или природы внешних воздействий. В этом случае ДС можно рассматривать как систему анизотропных сред, разделенных границами, на которых в зависимости от класса симметрии среды происходит изменение диэлектрических, электрооптических, упругих, пьезоэлектрических или магнитоупругих параметров.

Поэтому используемое понятие "индуцированные домены" можно напрямую связать с возможностью посредством внешних воздействий создавать домены необходимой конфигурации и уже из них формировать соответствующие периодические доменные структуры (ПДС). Подобные индуцированные домены представляют определенный интерес для их использования в качестве инициаторов различных физических эффектов, которые могут быть положены в основу принципов построения измерительных датчиков для задач магнитометрии.

Рассмотрим возможные механизмы образования в упорядоченных магнетиках динамических ДС, индуцированных полем ультразвуковой волны.

Кинетика образования акустически индуцированных доменов качественно отличается от процессов обычного доменообразования в магнетиках. Для рассматриваемого случая соотношение ширины домена d и доменной границы δ будет зависеть от амплитуды деформации u в акустической волне следующим образом:

$$d = (\lambda/2) - \delta$$

где $\delta = (\alpha\lambda/\gamma u)^{1/3}$, λ — константа неоднородного обмена.

Поэтому с увеличением амплитуды u ширина доменной границы уменьшается, ширина домена растет до $\lambda/2$, а сама полосовая доменная структура возникает при $\delta \approx d$.

Причиной существования эффекта индуцированных доменов может являться возникновение дополнительной одноосной магнитной анизотропии, обусловленной магнитострикцией. Этот эффект наиболее сильно должен проявиться вблизи ориентационных магнитных фазовых переходов типа «легкая ось»—«легкая плоскость». При достаточной амплитуде акустической волны будет происходить периодическое изменение значения и знака константы магнитной анизотропии, приводящее к анизотропии "легкая плоскость" в области сжатия и к анизотропии "легкая ось" в области растяжения (при положительном знаке константы магнитострикции).

Выполнение условия значительного преобладания энергии анизотропии над обменной энергией обеспечит разбиение изначально магнитооднородного образца на отдельные слои с чередующимися направлениями намагниченности: вдоль и поперек направления распространения акустической волны.

Магнитоупругие эффекты оказывают сильное влияние также на упругие свойства. Известно, что модуль упругости Юнга есть отношение приложенных напряжений P к относительному удлинению образца $\Delta l/l$. В случае магнитоупорядоченных материалов при приложении напряжений возникает механострикция — дополнительная магнитострикционная деформация $(\Delta l/l)_m$, которая добавляется к обычной $\Delta l/l$. Поэтому значение упругого модуля Юнга изменяется в соответствии с выражением

$$E = \frac{P}{\Delta l/l + (\Delta l/l)_m}.$$

В величину механострикции $(\Delta l/l)_m$ вносят вклады процессы смещения доменных границ и процесс вращения векторов спонтанной намагниченности I_s под действием приложенных механических напряжений.

Известно, что сила F , приложенная к твердому телу, вызывает относительную деформацию

$$\lambda \Delta l/l = F/(ES),$$

где $\Delta l/l$ — относительное удлинение образца длиной l ; S — площадь сечения образца; E — модуль упругости (модуль Юнга).

В магнитоупорядоченных средах распространение акустических волн связано с трансформацией волн на доменных границах и возбуждением связанных магнитоупругих колебаний. Для такого процесса необходимо, чтобы упругие колебания $u(k, t)$ сопровождалось колебаниями намагниченности

$$\Delta M_u(k_n, t) = \lambda u(k_n, t),$$

где коэффициент λ зависит от величины магнитоупругого тензора \mathbf{b} , волнового вектора k_n и разности частот спиновой и упругой волн.

Магнитоупругий механизм возбуждения и преобразования акустических волн наиболее эффективен при условии, что амплитуда колебаний намагниченности будет превосходить саму намагниченность или хотя бы будет сравнима с ней:

$$\Delta M_u(k_n, t) / M_u(k_n, t) = \eta(k_n, t) \geq 1,$$

где η – магнитоупругий коэффициент усиления колебаний намагниченности.

В магнетике при распространении бегущей волны индуцированная доменная структура будет перемещаться по образцу со скоростью акустической волны, а при возбуждении стоячей волны периодическая ДС будет иметь устойчивое пространственное распределение, определяемое периодом этой волны. В этом случае стоячая акустическая волна создает пьезоэлектрическое поле, при достаточной интенсивности которого возникает образование структуры инвертированных доменов с периодом, равным периоду стоячей акустической волны.

Сформированные таким образом доменные структуры обладают полосовым акустическим спектром, состоящим из зон полного пропускания и полного отражения, и могут считаться своего рода «фононными кристаллами». На микроскопическом уровне процесс образования доменной структуры можно объяснить тем, что электрическое поле, сопровождающее акустическую волну в пьезомагнитной структуре (пьезоэлектрическое поле), можно считать квазистатической волной.

Таким образом, в магнетиках может возникать соответствующая полосовая доменная структура с 90° -ными доменными границами. Если при этом, время релаксации составляет величину, меньшую периода колебаний, то намагниченность будет успевать подстраиваться под упругие деформации, создаваемые акустической волной. Для реальных магнетиков таким условиям удовлетворяют акустические колебания с частотами до нескольких мегагерц.

Такая спонтанно возникшая доменная структура в магнетике, как правило, является равновесной и соответствует минимуму его энергии. В связи с тем, что домен является областью однородного намагничивания, а реальные ферромагнетики имеют многодоменную структуру, то можно сделать вывод о том, что внутри каждого домена существует анизотропная магнитоэлектрическая деформация, т.е. спонтанная магнитоэлектрическая деформация, которая в свою очередь является результатом локальных деформаций, обусловленных магнитоупругим взаимодействием магнитных электронов с окружающими атомами. Величина такого магнитоупругого взаимодействия определяется зависимостью от межатомных расстояний обменных взаимодействий и взаимодействий электронных магнитных слоев ионов с локальными электрическими полями. В этом случае спонтанная магнитоэлектрическая деформация играет немаловажное значение в рассматриваемых физических процессах.

Акустические волны, распространяющиеся через ДС в упорядоченных магнетиках, вследствие различия в знаках пьезоэлектрических коэффициентов в соседних доменах будут испытывать отражение и преломление. В этом случае границы доменов вносят дополнительный вклад акустической нелинейности в магнитоупорядоченную среду, что в свою очередь расширяет возможности использования таких линейных и нелинейных акустических эффектов, как отражение, преломление и генерация основной и высших гармоник, параметрическое преобразование частоты.

За основу процессов отражения и преобразования акустических мод на доменной структуре магнетиков можно взять высказанное ранее предположение о существовании неоднородных магнитоэлектрических деформаций в объеме доменных границ (ДГ).

Возбуждение колебаний ДГ может вызываться как продольной, так и поперечной акустическими волнами. В любом случае, независимо от типа падающей акустической волны по обе стороны от ДГ, будут генерироваться вторичные (рассеянные) продольные и поперечные волны. Следовательно, при рассеянии волн на границе будет происходить взаимные превращения продольных и поперечных акустических волн.

При взаимодействии двух встречных акустических волн возникает ток

$$j_a = q\mu(n_{a1}E_{a1} + n_{a2}E_{a2}),$$

где q – заряд электрона; μ – подвижность электронов; n_a – концентрация электронов, зависящая от интенсивности акустических колебаний и определяемая величиной нелинейного акустоэлектронного взаимодействия; E_a – напряженность пьезоэлектрического поля.

При равенстве частот и напряженностей пьезоэлектрических полей встречных волн ток j_a создает пространственно модулированный электрический потенциал с нулевой частотой и волновым вектором $k_a = 2\omega/V_a$, где V_a – скорость акустической волны.

Таким образом, равномерно акустически генерируемые электроны будут находиться в пространственно модулированном электрическом поле

$$E_d = qgt\mu\epsilon u / (\epsilon\epsilon_0)^2,$$

где g – скорость генерации носителей; t – время действия акустической волны.

Следовательно, индуцированное акустической волной поле пространственного заряда будет пропорционально величине относительной деформации, создаваемой данной акустической волной.

Поскольку в диапазоне частот 10^7 – 10^8 Гц длина свободного пробега электронов во много раз меньше длины акустической волны, то пьезоэлектрическое поле можно рассматривать как источник возмущения начальной равномерной плотности свободных электронов (n_0).

В определенных условиях также возможно преобразование объемных волн в поверхностные волны. Однако число преобразованных волн уменьшается при направлении распространения волны, в котором существуют чистые моды. Коэффициенты отражения и преломления акустических волн, распространяющихся вдоль ДС, можно определять с помощью модели взаимодействующих мод. Например, для поперечных акустических волн коэффициенты отражения и преломления будут определяться углами падения θ волны на доменную структуру и коэффициентами электромеханической связи K . Так, квадрат модуля коэффициента отражения имеет вид

$$|R|^2 = Q^2 \left[Q^2 + \frac{\sin^2(k_1 D)}{\sin^2(Nk_1 D)} \right]^{-1},$$

где $Q^2 = 4K^4 \times \text{tg}^2 \theta \times \cos[(k_2 d_A) - K^2 \sin(k_2 d_A)]^2$; k_1 – вектор ПДС; k_2 – акустический волновой вектор; $D = d_A + d_B$ – период ПДС.

Исходя из логики представленной интерпретации следует, что формируемую акустическим полем в пьезомагнетике ПДС можно рассматривать как систему периодически расположенных источников переменных электрических или магнитных полей, которые образованы границами доменов, имеющих противоположные знаки пьезоэлектрических или магнитоупругих коэффициентов. Эффективная генерация возникает при условии совпадения фаз источников, что соответствует совпадению (или кратности) периода ПДС с длиной акустической волны. В этом случае резонанс акустических волн на ПДС возникает на частотах

$$f = nV/D, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где V – скорость объемных или поверхностных волн; D – период ПДС.

Причем, несмотря на то, что общая длина ПДС L , хотя и не влияет на параметры резонансных частот, фактически определяет значения коэффициента преобразования M акустической энергии в электрическую энергию:

$$M \sim K^2 N_d$$

где K – коэффициент электромеханической или магнитоупругой связи, N_d – число доменных границ.

В результате взаимодействия между упругими колебаниями и однородной прецессией намагниченности, обусловленной магнитоупругим взаимодействием, можно ожидать аномального усиления описываемых физических эффектов, т.е. магнитоакустический эффект, а максимальное значение самого коэффициента преобразования M акустической энергии в электрическую энергию будет наблюдаться при совпадении частот акустического и ферромагнитного резонансов [6].

Кроме того, важно отметить и наличие эффекта влияния стационарной (фиксированной) доменной структуры феррита на акустическую накачку. В этом случае движущуюся ДГ можно рассматривать как своеобразную волну возмущения (волну параметра), бегущую в покоящейся среде. Сильная подвижность, а также большая нелинейность такой магнитной подсистемы оказывают значительное влияние на акустические характеристики этих материалов. Здесь, в отличие от большинства случаев релаксационных явлений в акустике, появляются возможности управления характеристиками (временем релаксации и т.д.) с помощью внешних магнитных полей. Индуцирование акустической волной на доменной стенке знаменующихся (с периодичностью, определяемой проекцией волнового вектора падающей волны на ДГ) магнитных полюсов вызывает, в свою очередь, эффективный резонансный отклик магнитной подсистемы посредством полей сопутствующих магнитоэластических колебаний.

Обоснование нового способ возбуждения феррозондов

Для целостного восприятия результатов анализа акустических эффектов в упорядоченных магнетиках воспользуемся элементами теории ФЭ, что позволит в последующем существенно упростить проблему выбора технического решения для рассматриваемого круга задач.

Исходя из определения ФЭ, воздействий, физического объекта и результата воздействия каждый ФЭ можно представить в виде модели черного ящика (рис. 1.), где A – воздействие, B – физический объект, C – результат воздействия (эффект).

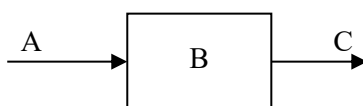


Рис. 1. Модель черного ящика ФЭ.

Функционирование любой технической системы основано на проявлении тех или иных ФЭ. Совокупность взаимосвязанных ФЭ образует физическую основу технической системы, т.е. для нашего случая УМ. Проявление ФЭ осуществляется в три стадии: 1– начальная стадия, связанная с приложением воздействия; 2 – установившееся проявление результата воздействия; 3 – и конечная стадия, связанная со снятием воздействия.

Такое проявление ФЭ обусловлено следующими причинами: 1 – реакцией на воздействие со стороны физического объекта; она проявляется как по отношению к внешним воздействиям, так и по отношению к взаимодействиям между ФЭ, составляющими, например, физическую основу технической системы; 2 – аккумулярованием физическим объектом некоторой части энергии воздействия,

которая проявляет себя после снятия воздействия; 3 – временем протекания процессов на уровне структурных элементов физического объекта.

В рассматриваемом случае следует иметь в виду, что исследуемый объект (сердечник ФД) представляет собой сложную иерархическую систему, характеризующуюся несколькими структурными элементами и связями между ними. Функционирование таких объектов основывается на проявлении множества взаимосвязанных ФЭ.

Принимая во внимание, что ФЭ, как правило, имеют несколько результатов своего воздействия и могут зависеть от ряда параметров дополнительного воздействия, можно синтезировать сложные структуры взаимосвязанных ФЭ, обеспечивающих реализацию исследуемого объекта с несколькими входами и выходами, с обратными связями, с использованием комплексов ФЭ для реализации часто встречающихся функций. Совокупность ФЭ будет представлять собой физическую схему объекта (ФСО), которая дает представление о том, какие заданные входные параметры исследуемого объекта преобразуются в заданные выходные параметры. Элементами ФСО являются физические объекты, на которых проявляются ФЭ. Взаимосвязи между элементами ФСО характеризуют типы преобразований физических величин.

В отличие от электрических и других схем, в которых, как правило, осуществляется преобразование какого-либо одного вида энергии (сигнала), в ФСО могут осуществляться различные преобразования. В этом отношении ФСО имеют много общего с функциональными схемами. Элементы ФСО являются элементами низшего уровня иерархии. Поэтому она является более детальной, чем принципиальная схема, где элементами могут являться сложные объекты техники, функционирование которых основано на использовании ряда ФЭ. Ряд элементов объектов техники (датчики, преобразователи и др.) можно охарактеризовать только с помощью ФСО.

На основе теории ФЭ более подробно опишем принцип действия УМ, реализующего акустоэлектромагнитный эффект возбуждения феррозонда. Для этого, исходя из ранее сделанного анализа возможных механизмов возбуждения ДС, предлагается вариант ФСО (рис. 2), где АП - акустическое поле; ИМП – измеряемое магнитное поле; КР – кристаллическая решетка; ЭПР – электроны проводимости; СП – силовое поле; ЭП – электрическое поле; ЭМП – электромагнитное поле; ММП – магнитомодуляционное поле; ИК – измерительная катушка; ЭДС_{ТР} и ЭДС_{ММ} – соответственно трансформаторная и магнитомодуляционная электродвижущие силы.

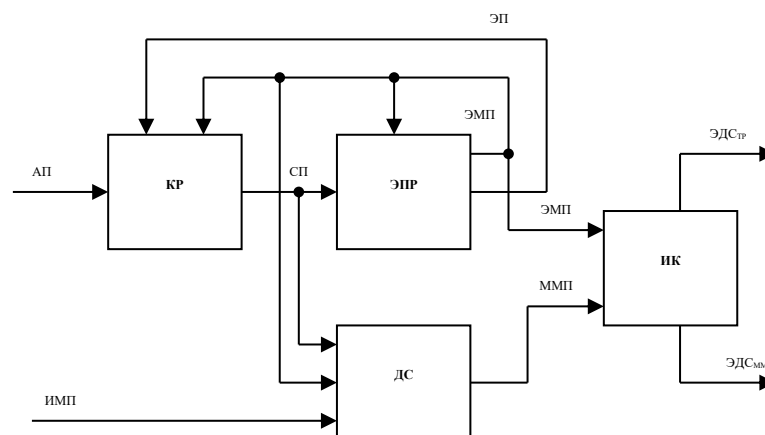


Рис.2. Структурная схема физических эффектов при механической накачке.

Необходимым условием для реализации ФЭ является наличие в физическом объекте структурных элементов – носителей заряда, которые являются носителями ЭП. До приложения акустического воздействия поля этих структурных элементов не имели

внешнего проявления. Поскольку результаты воздействия в этих ФЭ отличаются друг от друга (АП, СП, ЭМП), то для обеспечения взаимодействия с внешним воздействием используются разные физические объекты, содержащие соответствующие этим воздействиям структурные элементы. Таким образом, проявление ФЭ, обеспечивающих преобразование одних физических полей в другие, обуславливается наличием в составе физических объектов двух типов структурных элементов: 1 – взаимодействующих с внешним воздействием; 2 – обладающих физическим полем, соответствующим результату воздействия. В этом случае преобразования как такового одного физического поля в другое не происходит. Происходит лишь передача энергии одного физического поля через соответствующие структурные элементы другим структурным элементам-носителям другого физического поля, т.е. осуществляются изменения во взаимосвязях между структурными элементами.

При проявлении акустоэлектрического эффекта под действием АП возникают колебания КР, которые рассматриваются как волны упругой деформации (УД) или как источник СП. В этом случае происходит обмен энергией и импульсом между волнами УД и ЭПР. Передача энергии от акустической волны электронам приводит к дополнительному поглощению АП, а передача импульса от акустической волны электронам – к изменению их концентрации и появлению ЭП. Кроме того, пространственные колебания ДС, вызванные внутренними ЭМП и СП, осуществляют процесс модуляции ИМП, что в итоге приводит к появлению ММП. В последующем ЭМП и ММП по закону электромагнитной индукции в ИК одновременно наводят соответственно ЭДС_{ТР} и ЭДС_{ММ}.

В зависимости от кратности отношения длины составного ферритового сердечника ФД к длине полуволны возбуждаемого в этом сердечнике волнового процесса функционирование магнитометра реализуется в режиме феррозонда-градиентометра (при четной кратности) либо в режиме феррозонда-полемера (при нечетной кратности). Разработанная структурная схема ФЭ для УМ с упругим возбуждением, т.е. посредством акустических волн, подтверждает возможность физической реализации нового типа феррозондового магнитометра с УМ на основе акустоэлектромагнитного эффекта.

Экспериментальная проверка данного предположения показала, что при воздействии первичной акустической волны с определенными параметрами (режим стоячей волны) на ДГ и обеспечении при этом соответствующего резонансного режима для реализации магнитоупругого взаимодействия в ЧЭ ФД, возможно появление эффекта механической генерации большого количества свободных носителей. В этом случае акустическую генерацию можно представить в виде двухэтапного процесса: на первом из них происходит механическое возбуждение большого количества свободных носителей, электрическое поле которых уменьшает величину поля поляризации в каждом из доменов; на втором этапе скачки электрического поля вследствие обратных знаков пьезоэлектрических коэффициентов в соседних доменах создают переменные деформации. При этом процессе на границах доменов будут возникать сильные градиенты переменного электрического поля с частотой ω , соответствующей периоду доменной структуры, а на съемном элементе индукционного преобразователя будут детектироваться непрерывные радиосигналы, соотношенные по времени прохождения на детекторы, как сигналы продольной и поперечной компонент стоячей приповерхностной акустической волны. Максимумы частотного спектра этих типов волн соответствуют условию равенства длины акустической волны периоду доменной структуры.

Исходя из проведенного анализа структурной схемы ФЭ при взаимодействии акустических волн с магнитоупорядоченной структурой, можно констатировать, что

отличительная особенность магнитоэлектрических волн в подобных структурах состоит в их локализации границами раздела сред и способностью эффективно удерживаться ДГ [7]. Кроме того, поведение магнитоэлектрических и спиновых волн на движущихся ДГ рассматривается в магнитодинамике именно в связи с проблемой их устойчивости при внешних воздействиях или поступательном перемещении. В этом случае показательным является факт установления устойчивого режима движения ДГ и характер возмущений, развивающихся по внутренним (структурным) степеням свободы доменных стенок. В отличие от обычных границ раздела сред, ДГ могут перемещаться по ферромагнетику под внешним управляющим воздействием не только магнитного, но и акустического поля [7].

С учетом вышесказанного, можно предположить существование возможности использования именно ДГ в качестве элемента, регулирующего процессы перемагничивания ферромагнитного образца и канализирующего магнитоэлектрические (спиновые) волны, генерируемые внешним энергетическим источником. В этом случае упругое возбуждение магнитоупругой волны в ферромагнитном ЧЭ рассматриваемого варианта ФД может быть осуществлено, например, с помощью пьезоэлектрического преобразователя, плотно контактирующего с поверхностью ЧЭ и возбуждающего в нем линейно поляризованное упругое смещение с частотой подведенного к преобразователю электрического напряжения.

Предложенная интерпретация механизма комплексной трансформации волнового фронта акустических волн на ДГ однородно упорядоченных магнетиков стала основой для разработки нового способа возбуждения ферромагнитного стержня (ЧЭ) ФД.

Вариант конструктивного исполнения УМ для возбуждения ФД схематично представлен на рисунке 3, где 1 – пьезоэлемент; 2' и 2'' – токопроводящие электроды пьезоэлемента 1; 3 – ось геометрической симметрии; 4 – технологическое отверстие для подвода электрического напряжения к токопроводящим электродам пьезоэлемента; соответственно узел и пучность акустической волны; 5 и 6 – диэлектрические цилиндрические втулки, образующие разъемный базисный элемент; 7 и 8 – ферритовые стержни модулятора; 9 – стоячие акустические волны.

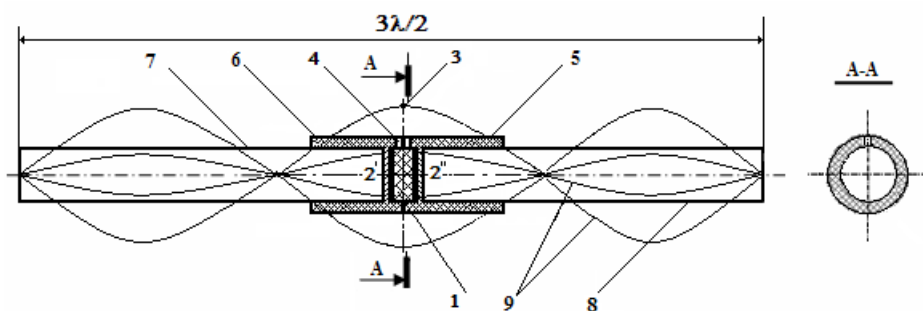


Рис.3. Вариант конструкции варианта модулятора ФД.

При подведении высокочастотного (ВЧ) напряжения к токопроводящим электродам 2' и 2'' пьезоэлемента 1 в нем возникает обратный пьезоэффект. В этом случае, при определенных параметрах возбуждающего ВЧ напряжения, в резонансном режиме в ферритовых стержнях 7 и 8 образуются стоячие акустические волны 9 определенной конфигурации, которые и инициируют локальное возбуждение периодических доменных сегментов в ферритовых стержнях. Магнитомеханические осцилляции доменных сегментов в соответствующих сечениях ферритовых стержней, фактически воспроизводя закон изменения акустических стоячих волн, становятся полным аналогом электромагнитных волн (электромагнитная эмиссия), которые в дальнейшем и определяют последующие эффекты электромагнитной индукции.

Следует отметить тот факт, что любые перемещения ДС в структуре ферритовых

стержней (упорядоченные магнетики) 8 и 7 сопровождаются достаточно интенсивной электромагнитной эмиссией, механизм излучения которой связан, скорее всего, с наличием переменных макротоков поляризации в ядре движущегося ДС. Несмотря на то, что коэффициент преобразования механической энергии ДС в электромагнитное излучение есть относительно небольшая величина, однако, возможен быстрый рост интенсивности электромагнитной эмиссии при увеличении частоты и амплитуды колебаний ДС.

Для повышения эффекта электромагнитной эмиссии дислокаций в ферритовых стержнях 8 и 7 необходимо одновременное и согласованное возбуждение большого числа ДС. Такое возбуждение может быть достигнуто только при одновременном наступлении резонансных режимов как для процесса образования электромагнитного излучения, так и для процесса упругого возбуждения (акустической накачки).

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили существование бегущего ДС, созданного продольной акустической волной в ферритовом цилиндрическом стержне ЧЭ ФД. При этом бегущий ДС перемещался со скоростью бегущей акустической волны, а на самом индуцированном ДС при определенных условиях наблюдалось резонансное усиление акустических колебаний.

Таким образом, при акустическом возбуждении ЧЭ ФД фиксировался устойчивый эффект возникновения осциллирующих и бегущих ПДС, которые модулировали измеряемое постоянное магнитное поле, создавая тем самым стоячую или бегущую электромагнитную волны, что в итоге приводило к индуцированию в измерительных обмотках ФД соответствующих э.д.с., функционально связанных с параметрам измеряемого магнитного поля.

Обобщая, можно констатировать, что результаты исследований эффекта «индуцированных доменов» и его возможного применения позволяют говорить о возникновении в геофизическом приборостроении нового направления, вобравшего в себя совокупность разнообразных свойств электро- и магнитоупорядоченных структур, используемых в качестве материала для ЧЭ ФД нового типа.

На основе полученных результатов научных исследований возможно существенно улучшить технические характеристики ФД, что позволит, в свою очередь, эффективно проводить общую магнитную съемку Земли и палеомагнитные исследования; успешно решать задачи региональной структурной геологии, геологического картирования разных масштабов, поисков и разведки полезных ископаемых; с высокой степенью детализации изучать геолого-геофизические особенности и трещиноватости пород.

Литература

1. Яновский Б. М. Земной магнетизм. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. – 592 с.
2. Федынский В.В. Разведочная геофизика. – М.: Недра, 1964. – 672 с.
3. Афанасьев, Ю.В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
4. Брякин И.В. Способ возбуждения феррозонда и устройство модулятора для его осуществления / Патент КР №1873 G01V 3/00, G01R 33/02 – Оpubл. 30.06.2016, Бюл. № 6.
5. Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Лещенко П.В. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208 с.
6. Петров Р.В., Бичурин М.И. и др. Резонансные эффекты в магнитоэлектрично-пьезоэлектрических композитах для твердотельных электронных устройств // Palmarium Academic Publishing, 2012. – 264 с.
7. Брякин И.В. К вопросу снижения уровня ложных сигналов в феррозондах // Проблемы автоматики и управления.– 2009.– №2. – С.125–133.