



(19) KG (11) 1873 (13) C1
(51) G01V 3/00 (2016.01)
G01R 33/02 (2016.01)

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ И
ИНОВАЦИЙ ПРИ ПРАВИТЕЛЬСТВЕ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ к патенту Кыргызской Республики под ответственность заявителя (владельца)

(21) 20150063.1

(22) 08.06.2015

(46) 30.06.2016, Бюл. № 6

(76) Брякин И. В. (KG)

(56) Семенов Н. М., Яковлев Н. И. Цифровые феррозондовые магнитометры. - Л.: Энергия, 1978. - С. 6, рис. 1-1а

(54) Способ возбуждения феррозондов и устройство модулятора для его осуществления

(57) Изобретение относится к области измерения магнитных полей при проведении геофизических и космических исследований, разведке полезных ископаемых.

Задачей изобретения является повышение точности измерения и улучшение технологических параметров феррозондов за счет существенного снижения температурного дестабилизирующего фактора, повышения помехоустойчивости и упрощения конструкции модулятора феррозонда.

Поставленная задача решается тем, что в способе возбуждения феррозондов, включающем изменение магнитного состояния ферромагнитного сердечника конечной длины посредством устройства модулятора, на ферромагнитный сердечник воздействуют перпендикулярно его продольной оси симметрии переменным электрическим полем, которым в объеме ферромагнитного сердечника на резонансной частоте модулятора возбуждают стоячую модулирующую поперечно-электрическую ТЕ волну или волну магнитного типа Н, при этом резонансный режим устройства модулятора устанавливают таким образом, чтобы на всей длине ферромагнитного сердечника укладывалась $3/2$ длины λ стоячей возбуждаемой волны и ее средняя пучность располагалась на поперечной оси симметрии ферромагнитного сердечника.

В устройстве модулятора для осуществления способа, содержащем круглый ферромагнитный сердечник конечной длины, излучающий дипольный элемент, охватывающий часть длины ферромагнитного сердечника, дипольный элемент выполнен в виде С-антенны, состоящей из двух отдельных токопроводящих элементов в виде боковых поверхностей тонкостенных полуцилиндров, закрепленных симметрично на внешней поверхности тонкостенной диэлектрической цилиндрической втулки и ориентированных большей своей стороной вдоль ее образующей, и расположенной симметрично относительно поперечной оси симметрии ферромагнитного сердечника, выполняющего одновременно функции элемента настройки режимов работы С-антенны и элемента модуляции измеряемого постоянного магнитного поля.

2 н. п. ф., 4 фиг.

Изобретение относится к области измерения магнитных полей при проведении геофизических и космических исследований, разведке полезных ископаемых.

При использовании феррозондов по назначению применяются гальванический и индуктивный способы возбуждения переменного магнитного поля, изменяющего магнитное состояние их ферромагнитных сердечников. Источником переменного магнитного поля в этом случае служат соответственно переменный электрический ток проводимости через ферромагнитный сердечник и многовитковая катушка, обтекаемая переменным электрическим током проводимости.

Известен способ возбуждения феррозонда, заключающийся в изменении магнитного состояния ферромагнитного сердечника посредством модулятора, при котором на ферромагнитный сердечник воздействуют перпендикулярно его продольной оси симметрии переменным магнитным полем, источником которого является переменный электрический ток проводимости, пропускаемый через всю длину ферромагнитного сердечника. Данный способ является известным гальваническим способом возбуждения феррозондов, использующим взаимно-перпендикулярные магнитные поля (измеряемое постоянное магнитное поле и вспомогательное переменное магнитное поле), которые обеспечивают развязку цепей питания и выхода феррозонда (Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - С. 7, рис. 1.4а).

Недостатком данного способа является наличие двух возмущающих факторов: существенная температурная нестабильность физико-конструктивных параметров феррозонда и динамичные деградационные процессы в самом материале ферромагнитного сердечника. Одновременное воздействие этих факторов на феррозонд вызывает кумулятивный эффект общей временной нестабильности феррозонда, что в итоге сказывается на снижении точности измерения. Данный способ требует организации электрического контакта непосредственно с ферромагнитным сердечником феррозонда создает определенные конструктивные и технологические проблемы при реализации гальванического способа возбуждения.

Известен способ возбуждения феррозонда, заключающийся в изменении магнитного состояния ферромагнитного сердечника посредством модулятора, при котором на ферромагнитный сердечник воздействуют вдоль его продольной оси симметрии переменным магнитным полем, источником которого является переменный электрический ток проводимости, обтекающий многовитковую катушку, охватывающую часть ферромагнитного сердечника. Данный способ является способом индуктивного возбуждения феррозондов с использованием параллельных полей (измеряемое постоянное магнитное поле и вспомогательное переменное магнитное поле) (Семенов Н. М., Яковлев Н. И. Цифровые феррозондовые магнитометры. - Л.: Энергия, 1978. - С. 6, рис. 1-1а).

Известное устройство модулятора (УМ) для возбуждения феррозонда, выбранное в качестве прототипа заявляемого устройства, реализующее индуктивный способ возбуждения феррозондов, содержит ферромагнитный сердечник конечной длины, излучающий дипольный элемент, охватывающий часть длины ферромагнитного сердечника и выполненный в виде многовитковой катушки (Семенов Н. М., Яковлев Н. И. Цифровые феррозондовые магнитометры. - Л.: Энергия, 1978. - С. 6, рис. 1-1а).

Недостаток известного способа и УМ заключается в том, что они не обеспечивают требуемую точность измерения из-за температурного дестабилизирующего фактора, вызванного протеканием тока проводимости через многовитковую катушку, что в итоге и предопределяет значительную общую временную нестабильность физико-конструктивных параметров феррозонда в целом. Наличие в модуляторе многовитковой катушки возбуждения является источником дополнительных помех, существенно усложняет конструкцию и технологичность изготовления феррозонда. Кроме того, феррозонды с многовитковой катушкой возбуждения ориентированы на реализацию режима заданного тока проводимости, т. е. режима заданной напряженности поля возбуждения, при котором неизбежны значительные потери энергии и существенная нестабильность, как параметров составляющих элементов, так и нулевых показаний прибора.

Задачей изобретения является повышение точности измерения и улучшение технологических параметров феррозондов за счет существенного снижения температурного дестабилизирующего фактора, повышения помехоустойчивости и упрощения конструкции модулятора феррозонда.

Поставленная задача решается тем, что в способе возбуждения феррозондов, включающем изменение магнитного состояния ферромагнитного сердечника конечной длины посредством устройства модулятора, на ферромагнитный сердечник воздействуют перпендикулярно его продольной оси симметрии переменным электрическим полем, которым в объеме ферромагнитного сердечника на резонансной частоте модулятора возбуждают стоячую модулирующую поперечно-электрическую ТЕ волну или волну магнитного типа H , при этом резонансный режим устройства модулятора устанавливают таким образом, чтобы на всей длине ферромагнитного сердечника укладывалась $3/2$ длины λ стоячей возбуждаемой волны и ее средняя пучность располагалась на поперечной оси симметрии ферромагнитного сердечника.

В устройстве модулятора для осуществления способа, содержащем круглый ферромагнитный сердечник конечной длины, излучающий дипольный элемент, охватывающий часть длины ферромагнитного сердечника, дипольный элемент выполнен в виде С-антенны, состоящей из двух отдельных токопроводящих элементов в виде боковых поверхностей тонкостенных полуцилиндров, закрепленных симметрично на внешней поверхности тонкостенной диэлектрической цилиндрической втулки и ориентированных большей своей стороной вдоль ее образующей, и расположенной симметрично относительно поперечной оси симметрии ферромагнитного сердечника, выполняющего одновременно функции элемента настройки режимов работы С-антенны и элемента модуляции измеряемого постоянного магнитного поля.

В УМ реализуется режим заданного напряжения возбуждения, т. е. режим заданной индукции поля возбуждения, минимизирующий дестабилизирующие факторы.

Именно заявленные особенности конструктивного исполнения УМ обеспечивают, согласно способу, режим заданного напряжения возбуждения, т. е. режим заданной индукции поля возбуждения и тем самым достижения поставленной задачи.

Предлагаемые способ возбуждения феррозондов и устройство для его осуществления поясняются чертежами, где на фиг. 1 представлено распределение составляющих электромагнитной волны (ЭМВ), возбуждаемой переменным электрическим полем в ферромагнитном сердечнике;

на фиг. 2 - схема реализации заявляемого способа;

на фиг. 3 - схема УМ;

на фиг. 4 - УМ в составе феррозонда.

Предлагаемый способ возбуждения феррозондов осуществляется следующим образом.

Рассмотрим ферромагнитный сердечник феррозонда в качестве композитной среды, относящейся к классу так называемых киральных (chiral) сред, в которых при воздействии электромагнитным полем имеют место более общие связи типа $\bar{D}(\bar{E}, \bar{H})$ и $\bar{B}(\bar{H}, \bar{E})$. Подобную среду можно считать изотропным диэлектрическим наполнителем с равномерно расположенными упорядоченно (бианизатропная среда) или стохастически (биизотропная среда) медными спиральками с размерами, значительно меньшими рабочей длины волны воздействующего поля.

Взаимодействие электромагнитного поля с киральной средой реализуется посредством двух процессов, т. е. образованием киральной поляризации под действием внешнего магнитного поля \bar{H} и возникновением киральной намагниченности за счет действия внешнего электрического поля \bar{E} .

В основе механизма образования киральной поляризации под действием внешнего магнитного поля \bar{H} лежит тот факт, что переменное магнитное поле \bar{H} индуцирует в

соответствии законом электромагнитной индукции Фарадея э.д.с. в каждом из витков спиральки, в результате чего, вдоль длины спиральки образуется электрическое поле \vec{E}_i , которое эквивалентно полю электрического диполя.

Таким образом, за счет магнитного поля \vec{H} образуется элементарный диполь $\vec{P}_i(\vec{H})$ и возникает киральная составляющая вектора поляризованности среды

7

$$\vec{p}_k(\vec{H}) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\sum_{i \in \Delta V} \vec{P}_i(\vec{H}) / \Delta V \right).$$

Если рассматривать процесс возникновения киральной намагниченности за счет действия внешнего электрического поля \vec{E} , то в проводящей спиральке возникают токи i_ϕ , образующие вокруг спиральки магнитное поле \vec{H}_i , аналогичное полю магнитного диполя. В результате возникает магнитный момент \vec{M}_i , что приводит к образованию киральной намагниченности

$$\vec{J}_k(\vec{E}) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\sum_{i \in \Delta V} \vec{M}_i(\vec{E}) / \Delta V \right).$$

Таким образом, в киральных средах материальные уравнения связей можно представить в виде

$$\begin{aligned} \vec{D}(\vec{E}, \vec{H}) &= \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}(\vec{E}) + \vec{P}_k(\vec{H}), \\ \vec{B}(\vec{H}, \vec{E}) &= \mu_0 \vec{H} + \vec{J}(\vec{H}) + \vec{J}_k(\vec{E}) \end{aligned}$$

или в качестве уравнений Друде-Борна-Федо-рова

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \epsilon_a \vec{E} + \beta \epsilon_a \text{rot} \vec{E}, \\ \vec{B} &= \mu_a \vec{H} + \beta \mu_a \text{rot} \vec{H}, \end{aligned}$$

где β - коэффициент киральности.

Приведенные уравнения для киральной среды показывают существующую вариантиность типов действующих на среду факторов, что и определяет возможность эффективного воздействия переменным электрическим полем на рассматриваемую направляющую структуру (ферромагнитный сердечник). Результат такого воздействия будет проявляться в возбуждении в ферромагнитном сердечнике поперечно-электрических (ТЕ) волн или волны магнитного типа (Н). Это волны, электрическое поле которых перпендикулярно к направлению распространения (0Z), а магнитное поле имеет продольную составляющую ($H_z \neq 0$) (фиг. 1).

Уравнение продольной составляющей H_z в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \times \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} + g^2 H_z = 0,$$

где $g^2 = k^2 + \gamma^2$.

Решением данного уравнения является функция

$$H_z = [C_n J_n(gr) + D_n N_n(gr)] \times \cos(n\varphi),$$

где C_n и D_n - постоянные интегрирования; J_n и N_n - цилиндрические функции 1-го рода (Бесселя) и 2-го рода (Неймана).

Продольная составляющая H_z возбуждаемой волны магнитного типа в направляющей структуре осуществляет фактически модуляцию ее магнитной проницаемости.

Исходя из вышеизложенного, особенностей функционирования феррозонда и необходимости обеспечения нормального режима предлагается следующий способ возбуждения феррозондов.

На ферромагнитный сердечник 1 воздействуют переменным электрическим полем \vec{E} (фиг. 2), которое направляется перпендикулярно продольной оси симметрии ферромагнитного сердечника 1. После чего на резонансной частоте модулятора возбуждают стоячую поперечно-электрическую (TE) волну или волну магнитного типа (H). Резонансный режим работы модулятора осуществляется при условии того, что $3/2$ длины λ возбуждаемой стоячей волны 2 магнитного типа укладывается на всей длине ферромагнитного сердечника 1, а ее средняя пучность 4 устанавливается на поперечной оси симметрии 3 ферромагнитного сердечника 1.

Устройство модулятора для возбуждения феррозондов состоит из токопроводящих электродов 5 и 6, закрепленных на базирующей диэлектрической цилиндрической втулке 7, охватывающей часть длины ферромагнитного сердечника 1.

Устройство модулятора для возбуждения феррозондов работает следующим образом.

К токопроводящим электродам 5 и 6, образующих совместно с диэлектрической цилиндрической втулкой 7 С-антенну, прикладывается высокочастотное напряжение (ВЧ-напряжение). В этом случае между электродами 5 и 6 С-антенны возникнет электрическое поле E и через межэлектродное пространство протекает электрический ток, являющийся током смещения j_{cm} . В этом случае С-антенна, являющаяся «концентратором» силовых линий тока смещения j_{cm} , представляет собой конденсатор с сосредоточенной емкостью C , возбуждаемый с помощью длинной линии от питающего генератора. В соответствии с первым уравнением Максвелла наличие тока смещения $j_{cm} = \epsilon_a dE/dt$ является одним из признаков системы, создающей излучение электромагнитных волн (ЭМВ), интенсивность которого характеризуется уровнем напряженности электрического поля \vec{E} в окружающей среде с абсолютной диэлектрической проницаемостью ϵ_a .

В этом случае ток смещения j_{cm} приводит к появлению магнитного поля H , окружающего электрическое поле E и расположенного к нему ортогонально. При протекании тока смещения j_{cm} через конденсатор с сосредоточенной емкостью C фаза тока опережает фазу приложенного напряжения, что приводит к несовпадению во времени фаз электрического E и магнитного H полей и, тем самым, не позволяет создать оптимальные условия для возникновения излучения ЭМВ, т. е. выполнить все условия теоремы Пойнтинга.

Как отмечалось ранее, ферромагнитный сердечник 1 УМ по своей сути является композитной средой, относящейся к классу так называемых киральных (chiral) сред и поэтому ферромагнитный сердечник 1 УМ можно рассматривать в качестве трехмерной рабочей среды С-антенны, условно содержащей ферритовые и проводящие элементы, параметрами которой можно управлять. Исходя из этой особенности, можно использовать ферромагнитный сердечник 1 одновременно в качестве элемента настройки режимов работы С-антенны и элемента системы накачки УМ, что в свою очередь создаст условие возбуждения магнитных потоков, которые в токопроводящих электродах 5 и 6 наряду с поступательным (линейным) движением электронов обеспечивают и присутствие их доминирующего вращательного движения. В этом случае поля E и H , созданные одновременно при помощи фазирующей киральной среды ферромагнитного сердечника 1 и надлежащим образом пространственно расположенные в ней, обуславливают возникновение ЭМВ в соответствии с теоремой Пойнтинга на такой частоте, на которой реак-

тивное сопротивление сосредоточенной индуктивности киральной среды корректирует фазу тока смещения через конструктивную емкость *C*-антенны УМ. Эта частота приблизительно равна резонансной частоте контура, образованного внутренней сосредоточенной индуктивностью киральной среды ферромагнитного сердечника 1 и конструктивной емкостью *C*-антенны УМ. Поэтому при настройке УМ в резонанс, в рабочем пространстве между токопроводящими электродами 5 и 6 возникают электрические напряжения большой амплитуды, которые создают поле *E* значительной напряженности, вызывающее между ними ток смещения, который создает поле *H* в ферромагнитном сердечнике 1 в фазе с питающим токопроводящим электродом 5 и 6 напряжением, а значит и с полем *E*. В этом случае непосредственно в рабочей среде ферромагнитного сердечника 1 (фиг. 4) УМ 8, запитываемым переменным напряжением генератора 9, создаются модулирующие ЭМВ, которые в измерительных катушках 10' и 10'' феррозонда (фиг. 4) наводят трансформаторную э.д.с., а в случае наличия измеряемого постоянного магнитного поля формируют дополнительную модуляционную э.д.с. Для последующей обработки трансформаторная и модуляционная э.д.с. в виде соответствующих электрических сигналов передаются в электронный блок 11 феррозонда.

Такое конструктивное исполнение заявляемого УМ в составе феррозонда (фиг. 4) просто решает две основных задачи обеспечения требуемого режима функционирования *C*-антенны: электрическая, состоящая в согласовании генератора 9 с *C*-антенной УМ 8, и электродинамическая, заключающаяся в «согласовании» *C*-антенны УМ 8 с рабочим пространством среды ферромагнитного сердечника 1.

В *C*-антенне поле *E* и *H* фактически заключены в пределах физического объема ферромагнитной среды, а высокая эффективность их взаимодействия в пределах этого физического объема, где они сформированы одновременно, обеспечивает минимальные конструктивные размеры *C*-антенны и ее пространственную компактность.

Предлагаемая конструкция *C*-антенны наилучшим образом удовлетворяет необходимым условиям возбуждения ЭМВ, что обеспечивает высокую эффективность работы УМ в целом при относительно небольших его размерах и высокой технологичности изготовления. Кроме того, изменяя параметры фазирующей цепи УМ каким-либо внутренним или внешним способом, можно расширить полосу частот, для которых выполняется желательное фазовое соотношение.

УМ на базе *C*-антенны, осуществляющий предлагаемый способ возбуждения, слабо подвержен внешним возмущениям, обладает исключительной помехоустойчивостью и имеет очень высокое отношение сигнал/шум в условиях индустриальных и атмосферных помех. Применение данного УМ в феррозондах обеспечивает практически максимальное преобразование полей *E* и *H* в излучение ЭМВ, высокую точность измерения и существенное улучшение технологичности изготовления феррозонда в целом. Конструктивные и технологические особенности предлагаемого УМ позволит без особых сложностей использовать их в составе существующих феррозондов, существенно улучшая их точностные характеристики.

Экспериментальные исследования предлагаемого способа возбуждения феррозондов и устройства модулятора для его осуществления в составе феррозондов показали 2-х кратное увеличение точности и существенное улучшение их технологичности.

На основе предлагаемого способа возбуждения феррозондов и устройства для его осуществления открываются широкие возможности для проектировщиков магнитометрической аппаратуры в плане создания различных новых вариантов феррозондов с улучшенными техническими и технологическими характеристиками.

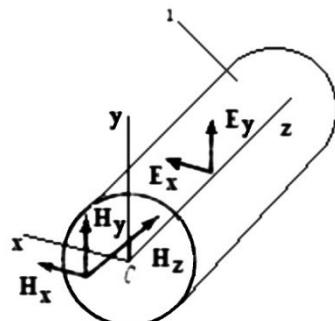
Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

1. Способ возбуждения феррозондов, включающий изменение магнитного состояния ферромагнитного сердечника конечной длины посредством устройства модулятора отли ча ю щ и й - ся тем, что на ферромагнитный сердечник воздействуют перпендикулярно его продольной оси

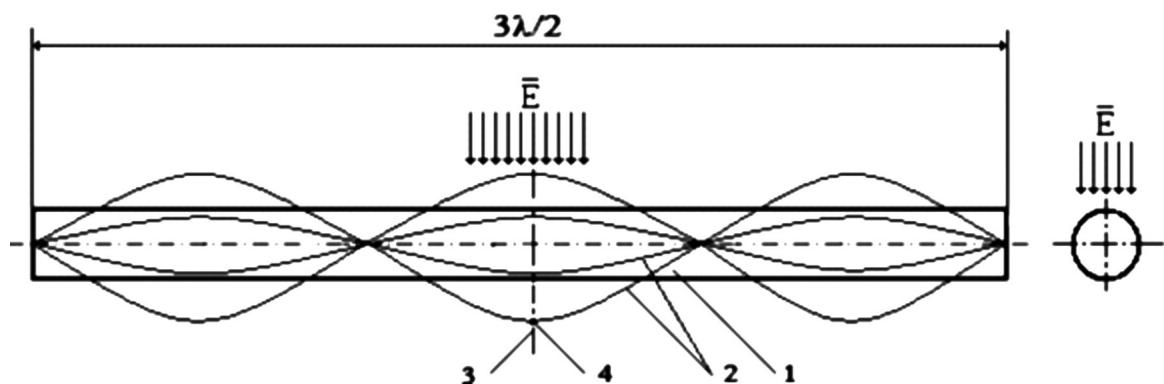
симметрии переменным электрическим полем, которым в объеме ферромагнитного сердечника на резонансной частоте модулятора возбуждают стоячую модулирующую поперечно-электрическую ТЕ волну или волну магнитного типа H , при этом резонансный режим устройства модулятора устанавливают таким образом, чтобы на всей длине ферромагнитного сердечника укладывалась $3/2$ длины λ стоячей возбуждаемой волны и ее средняя пучность располагалась на поперечной оси симметрии ферромагнитного сердечника.

2. Устройство модулятора для возбуждения феррозондов, содержащее круглый ферромагнитный сердечник конечной длины, излучающий дипольный элемент, охватывающий часть длины ферромагнитного сердечника, отличаящуюся тем, что дипольный элемент выполнен в виде С-антенны, состоящей из двух отдельных токопроводящих элементов в виде боковых поверхностей тонкостенных полуцилиндров, закрепленных симметрично на внешней поверхности тонкостенной диэлектрической цилиндрической втулки и ориентированных большей своей стороной вдоль ее образующей, и расположенной симметрично относительно поперечной оси симметрии ферромагнитного сердечника, выполняющего одновременно функции элемента настройки режимов работы С-антенны и элемента модуляции измеряемого постоянного магнитного поля.

Способ возбуждения феррозондов и
устройство для его осуществления

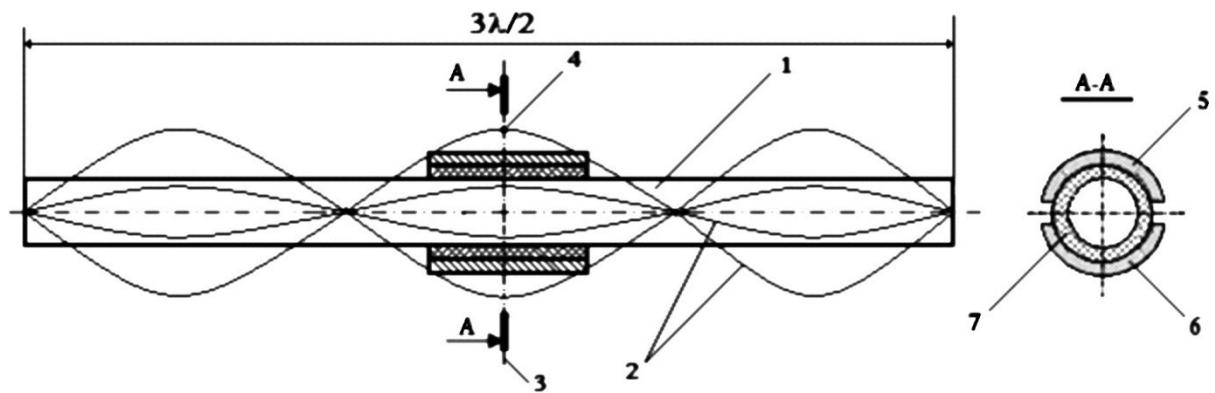


Фиг. 1

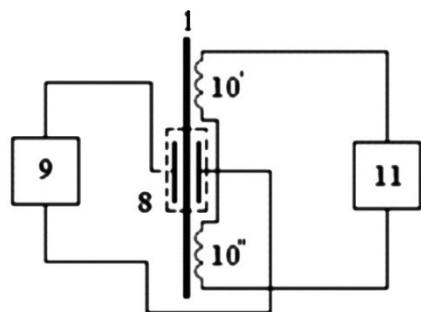


Фиг. 2

Способ возбуждения феррозондов и
устройство для его осуществления



Фиг. 3



Фиг. 4

Выпущено отделом подготовки материалов

Государственная служба интеллектуальной собственности и инноваций при Правительстве Кыргызской Республики,
720021, г. Бишкек, ул. Московская, 62, тел.: (312) 68 08 19, 68 16 41; факс: (312) 68 17 03