



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015117546, 12.10.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.10.2012Дата регистрации:
23.10.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.10.2012

(43) Дата публикации заявки: 27.11.2016 Бюл. № 33

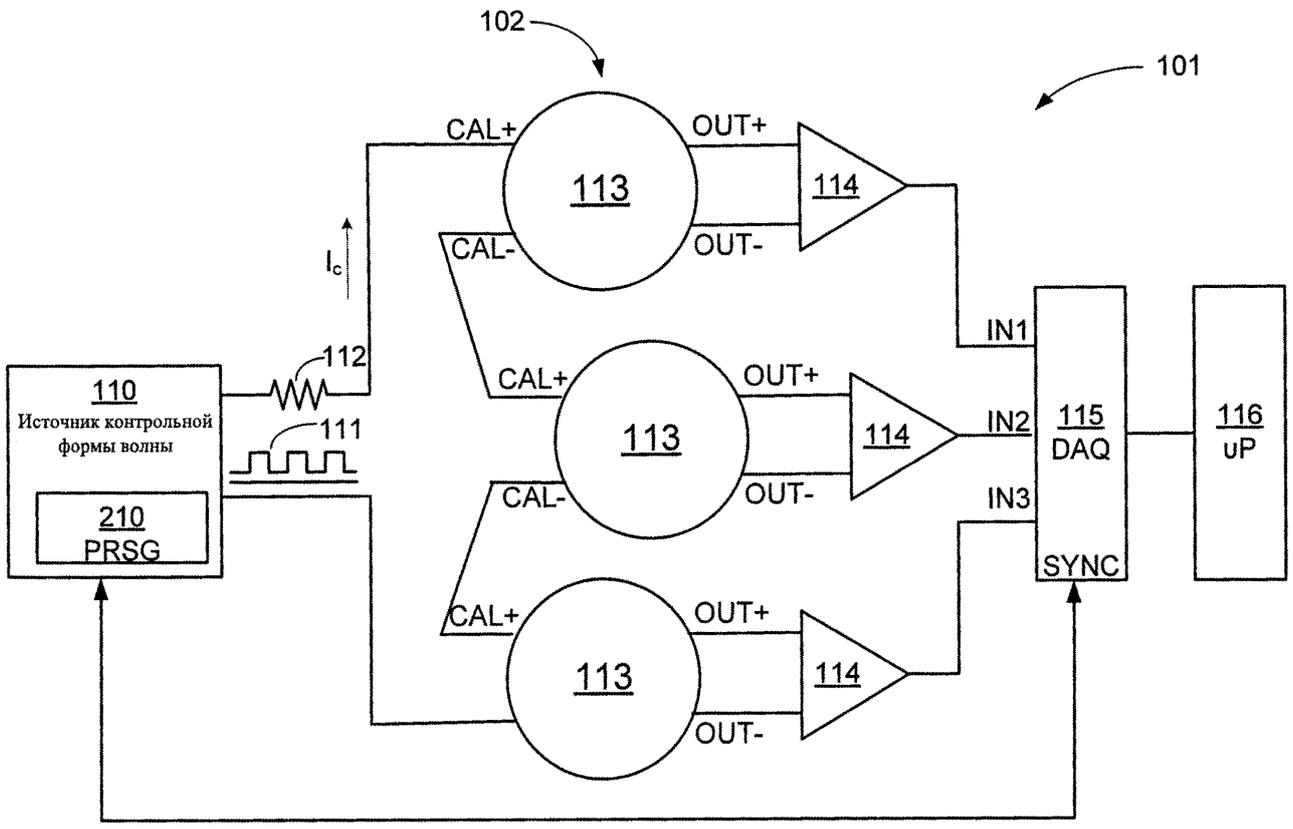
(45) Опубликовано: 23.10.2017 Бюл. № 30

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 08.05.2015(86) Заявка РСТ:
СА 2012/050721 (12.10.2012)(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2014/056069 (17.04.2014)Адрес для переписки:
129090, Москва, пр-кт Мира, 6, ППФ "ЮС",
Ловцову С.В.(72) Автор(ы):
ДОДДС Джэк (СА)(73) Патентообладатель(и):
ГЕОТЕК ЛТД. (СА)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 6534985 B2, 18.03.2003. RU
2461850 C2, 20.09.2012. WO 1994001791 A1,
20.01.1994. US 20120078558 A1, 29.03.2012.**(54) КАЛИБРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к электромагнитной геофизической съемке с активным источником. Сущность: система приемника электромагнитного излучения включает датчик магнитной индукции для генерации сигналов, представляющих изменения в принятом магнитном поле, источник формы волны для генерации контрольной формы волны, имеющей первый диапазон частот, калибровочную петлю, располагаемую, по меньшей мере временно, рядом с датчиком магнитной индукции, чтобы генерировать ответный сигнал калибровки в датчике магнитной индукции при применении контрольной формы волны к калибровочной петле, и систему

обработки для определения калибровочного коэффициента. Калибровочный коэффициент включает передаточную функцию и импульсный ответный сигнал для применения к сигналам от датчика магнитной индукции. Система обработки определяет калибровочный коэффициент в зависимости как от ответного калибровочного сигнала, так и от известной чувствительности датчика магнитной индукции во втором диапазоне частот, при котором известная чувствительность соответствует эффективной площади датчика магнитной индукции. Причем второй диапазон частот ниже первого диапазона частот. 4 н. и 16 з.п. ф-лы, 6 ил.



ФИГ. 2

RU 2634080 C2

RU 2634080 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2015117546, 12.10.2012**

(24) Effective date for property rights:
12.10.2012

Registration date:
23.10.2017

Priority:

(22) Date of filing: **12.10.2012**

(43) Application published: **27.11.2016** Bull. № 33

(45) Date of publication: **23.10.2017** Bull. № 30

(85) Commencement of national phase: **08.05.2015**

(86) PCT application:
CA 2012/050721 (12.10.2012)

(87) PCT publication:
WO 2014/056069 (17.04.2014)

Mail address:

**129090, Moskva, pr-kt Mira, 6, PPF "YUS",
Lovtsovu S.V.**

(72) Inventor(s):

DODDS Jack (CA)

(73) Proprietor(s):

GEOTECH LTD. (CA)

(54) **CALIBRATED SYSTEM FOR ELECTROMAGNETIC SURVEYING**

(57) Abstract:

FIELD: electricity.

SUBSTANCE: electromagnetic radiation receiver system includes a sensor for magnetic induction to generate signals that represent changes in the legislation adopted by the magnetic field source waveform to generate the reference waveform with the first frequency, calibration loop, an, at least temporarily, next to the sensor of magnetic induction to generate a response signal in the sensor calibration of magnetic induction, when applied to the calibration verification of wave forms a loop and processing system for the determination of calibration factor. Calibration

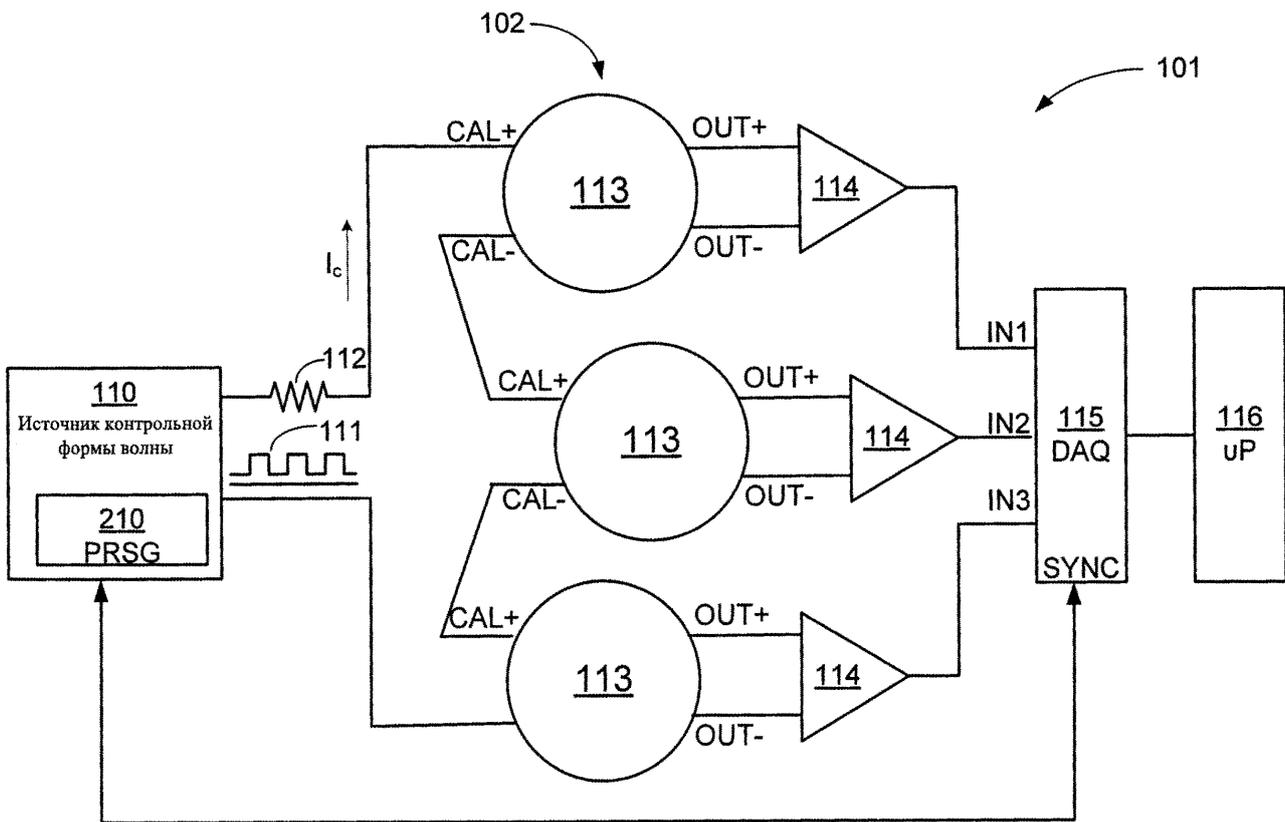
coefficient includes transfer function and impulse response signal to be applied to signals from the sensor of magnetic induction. Processing system determines the calibration factor depending how the response of the calibration signal and the known sensitivity of magnetic induction in the second the frequency range in which the known sensitivity corresponds to the effective magnetic induction of sensor area. The second frequency range is below the first frequency range.

EFFECT: increased sensitivity.

20 cl, 6 dwg

RU 2 634 080 C2

RU 2 634 080 C2



ФИГ. 2

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0001] Варианты осуществления, описанные в настоящем документе, относятся к области геологического картирования.

5 [0002] Электромагнитная (ЕМ) съемка с активным источником, такая как съемка методом ЗМПП (TDEM по международной классификации) является быстро развивающейся областью геофизической съемки. Она включает наземные и авиационные способы. Геологическое картирование методом ЗМПП включает измерение магнитного ответного сигнала земли на первичное магнитное поле, переданное системой съемки. Отношение между переданным первичным полем и ответным сигналом используется
10 для вычисления структуры электрического удельного сопротивления земли, из которой получают геологическую информацию.

[0003] Примеры систем и способов съемки методом ЗМПП приведены в патенте США №7,157,914 и в международных патентных заявках PCT/CA2009/001197, PCT/CA2009/000217 и PCT/CA2010/001863.

15 [0004] Электромагнитная съемка с естественным источником, такая как АФМАГ, является еще одной развивающейся областью геофизической съемки и также имеет наземное и авиационное применения. Она включает измерение магнитного ответного сигнала земли на естественные электромагнитные поля. Передаточные функции между компонентами магнитного поля, некоторые из которых можно измерить с помощью
20 движущегося приемника и некоторые - в фиксированном месте, используют для вычисления структуры электрического удельного сопротивления земли, из которой получают геологическую информацию.

[0005] Примеры систем и способов аэросъемки АФМАГ приведены в патенте США №6,876,202, патентной заявке США №12/910,386, опубликованной как документ US
25 2011/0115489 A1, и в патентной заявке США №12/645,915, опубликованной как документ US 2010/0244843 A1.

[0006] В практической системе электромагнитной съемки вторичный ответный сигнал земли принимается одним или несколькими приемниками (которые могут быть взаимно ортогональны) и регистрируется системой сбора данных. В системе с активным
30 источником воздействие первичного магнитного поля на приемник может быть уменьшено за счет использования компенсационной катушки, позволяющей более точно регистрировать вторичное поле. В частности, если используется компенсационная катушка, передаваемое первичное магнитное поле также можно принимать и регистрировать с помощью датчика тока.

35 [0007] В случае системы с активным источником на регистрируемую форму волны тока передатчика и формы волны вторичного магнитного поля влияет форма волны передаваемого первичного магнитного сигнала, форма волны компенсационной катушки и передаточные функции приемников и системы регистрации. Хотя такие воздействия стремятся к малым величинам при большом времени задержки (на низких частотах),
40 они становятся более важными при коротком времени задержки (на высоких частотах). В случае систем с естественным источником на амплитуду и фазу таких сигналов влияют приемники и система регистрации.

[0008] Для точной интерпретации зарегистрированных форм волны желательно уменьшить или устранить воздействия передаваемой первичной магнитной формы
45 волны, приемников и системы регистрации. Для этого необходимо, чтобы импульсная характеристика (передаточная функция) датчиков и системы регистрации была точно известна. Поскольку импульсные характеристики и передаточные функции изменяются (например, из-за изменений температуры), желательно измерять их с подходящими

интервалами в полевых условиях.

[0009] Приемниками в наземных электромагнитных системах с естественным источником обычно являются магнитно-индукционные датчики в форме соленоида с ферромагнитным сердечником. Такие приемники могут быть для удобства снабжены калибровочной обмоткой в форме соленоида, которая расположена поверх основной обмотки, немного выходит за концы сердечника и сопоставима по размеру с калибруемым датчиком. Это дает то преимущество, что магнитное поле внутри соленоидной обмотки можно точно вычислить, зная только шаг обмотки и протекающий к ней ток.

[0010] Приемниками в системах ЗМПП и электромагнитной аэросъемки с естественным источником обычно являются магнитно-индукционные датчики с воздушным сердечником в форме петель из нескольких витков провода. Такие петли могут иметь диаметр, например, порядка 1-8 м. Большие катушки с воздушным сердечником имеют преимущества, включающие более чистый временной ответный сигнал и более удобную форму для буксировки летательным аппаратом. В полевых условиях трудно обеспечить магнитное поле с точно известной формой волны и амплитудой в объеме достаточно большом, чтобы вмещать такой приемник.

РАСКРЫТИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0011] Согласно одному примеру варианта осуществления предложена система приемника электромагнитного излучения для геофизической съемки. Система приемника электромагнитного излучения включает датчик магнитной индукции для генерации сигналов, представляющих изменения в принятом магнитном поле, источник формы волны для генерации контрольной формы волны, имеющей первый диапазон частот, калибровочную петлю, располагаемую, по меньшей мере временно, рядом с датчиком магнитной индукции, чтобы генерировать ответный сигнал калибровки в датчике магнитной индукции при применении контрольной формы волны к калибровочной петле, и систему обработки. Система обработки конфигурирована на определение калибровочного коэффициента для применения к сигналам от датчика магнитной индукции путем определения калибровочного коэффициента в зависимости как от ответного калибровочного сигнала, так и от известной чувствительности датчика магнитной индукции во втором диапазоне частот, который ниже первого диапазона частот.

[0012] Согласно одному примеру варианта осуществления предложен способ калибровки системы приемника электромагнитного излучения для геофизической съемки, причем система приемника включает датчик магнитной индукции для генерации сигналов, представляющих изменения в принятом магнитном поле, источник формы волны для генерации контрольной формы волны, и калибровочную петлю, располагаемую, по меньшей мере временно, рядом с датчиком магнитной индукции. Способ включает: измерение ответного сигнала калибровки от датчика магнитной индукции на контрольную форму волны, имеющую первый диапазон частот, который подается на калибровочную петлю источником формы волны, и определение калибровочного коэффициента для будущего применения к съемочным сигналам от датчика магнитной индукции, причем калибровочный коэффициент определяется в зависимости как от ответного калибровочного сигнала, так и от известной чувствительности датчика магнитной индукции во втором диапазоне частот, который ниже первого диапазона частот.

[0013] Согласно одному примеру варианта осуществления предложена система приемника электромагнитного излучения для геофизической съемки, включающая:

датчик магнитной индукции, имеющий известную чувствительность на низких частотах, генератор контрольной формы волны тока, калибровочную петлю, сопоставимую по размерам с датчиком, и систему обработки для объединения данных измерений, полученных датчиком, когда контрольная форма волны подается на калибровочную петлю с известной чувствительностью датчика на низких частотах, чтобы получить передаточную функцию и импульсный ответный сигнал в применимом диапазоне частот датчика.

[0014] Согласно одному примеру варианта осуществления предложен способ калибровки системы приемника электромагнитного излучения для геофизической съемки, включающей по меньшей мере один датчик магнитной индукции, чтобы получить передаточную функцию системы в частотной области и импульсный ответный сигнал системы во временной области. Способ включает: определение низкочастотного ответного сигнала датчика путем вычислений, основанных на размерах датчика, генерацию известной формы волны тока, имеющей частотные компоненты, находящиеся в полезном диапазоне частот системы приемника электромагнитного излучения, пропускание этой формы волны тока через по меньшей мере одну калибровочную петлю, которая сопоставима по размерам с датчиком и расположена так, чтобы создавать магнитное поле в датчике, регистрацию ответных сигналов, генерированных датчиком, анализ зарегистрированных сигналов, чтобы определить, на нескольких частотах, отношение ответного сигнала датчика на этой частоте к низкочастотному ответному сигналу, и объединение этого отношения с известной чувствительностью на низких частотах датчика, чтобы получить передаточную функцию системы и импульсный ответный сигнал системы в полезном диапазоне частот системы.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[0015] Фиг. 1 - схема системы ЗМПП для аэросъемки.

[0016] Фиг. 2 - блок-схема системы приемника электромагнитного излучения с тремя датчиками, включающая калибровочную систему.

[0017] Фиг. 3 - схематический вид в плане датчика магнитной индукции с воздушным сердечником и с калибровочной петлей, который может быть использован в системе приемника с Фиг. 2 согласно одному примеру варианта осуществления изобретения.

[0018] Фиг. 4 - схематический вид сбоку датчика магнитной индукции с воздушным сердечником и с калибровочной петлей согласно еще одному примеру варианта осуществления изобретения.

[0019] Фиг. 5 - схематический вид сбоку датчика магнитной индукции с воздушным сердечником и с калибровочной петлей согласно еще одному примеру варианта осуществления изобретения.

[0020] Фиг. 6 - схематический вид еще одного примера системы ЗМПП, включающей систему для калибровки катушек датчика тока передатчика и приемника одной формой волны тока.

ОПИСАНИЕ ПРИМЕРОВ ВАРИАНТОВ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

[0021] Теперь будут описаны примеры вариантов осуществления калибруемой системы приемника для системы электромагнитной съемки с целью геологического картирования. В разных вариантах осуществления система приемника может быть использована в авиационных или наземных системах съемки, а также в системах с активным или естественным источником.

[0022] Для целей объяснения одного примера варианта осуществления на Фиг. 1 приведен схематический вид системы 100 с активным источником для аэросъемки методом ЗМПП, которая может включать калиброванную систему приемника. Система

100 для съемки методом ЗМПП включает петлю передатчика 104 и узел датчика 102. Система 100 для съемки методом ЗМПП может транспортироваться летательным аппаратом 28, таким как самолет, вертолет, аэростат или дирижабль. По меньшей мере в некоторых примерах вариантов осуществления петля передатчика 104 и узел катушки приемника 102 являются частью буксируемого узла 12, который буксирует летательный аппарат 28. В примере варианта осуществления, показанном на Фиг. 1, узел датчика 102 расположен по существу в центре петли передатчика 104, причем петля передатчика 104 опирается на раму 20, которая подвешена на нескольких тросах или канатах 16. Каждый из канатов 16 прикреплен к уникальной точке на окружности рамы 20 петли передатчика на одном конце и к общему буксирному тросу 15 на другом конце. В одном примере варианта осуществления рама 20 петли передатчика является простой многоугольной рамой, которая приближается к форме круга и выполнена из нескольких трубчатых сегментов, которые определяют непрерывный внутренний канал, в котором проходит петля передатчика 104. В некоторых примерах вариантов осуществления канаты 16 включают по меньшей мере один трос или канат подвески, который поддерживает узел датчика 102. Узел датчика 102 может в некоторых примерах вариантов осуществления быть расположен по центру с помощью последовательности проходящих радиально тросов или канатов 14, которые проходят к раме 20 петли передатчика. Согласно одному примеру варианта осуществления, при использовании петля передатчика 104 расположена горизонтально с по существу вертикальной дипольной осью, и узел датчика 102 расположен в центре катушки 104 передатчика.

[0023] Конфигурация буксируемого узла, показанная на Фиг. 1, является только одним примером из многих возможных физических конфигураций системы 100 для съемки методом ЗМПП - например, в некоторых вариантах осуществления узел датчика 102 может физически поддерживаться буксируемым узлом выше или ниже петли передатчика 104 или буксироваться сзади петли передатчика 104.

[0024] Теперь со ссылкой на Фиг. 2, в одном примере варианта осуществления узел датчика 102 является частью калиброванной системы 101 приемника электромагнитного излучения. В варианте осуществления, показанном на Фиг. 2, узел датчика 102 системы 101 приемника электромагнитного излучения имеет три узла датчиков магнитной индукции 113, которые могут, например, иметь взаимно ортогональные оси чувствительности. В альтернативных конфигурациях узел датчика 102 может иметь только один узел датчика 113 или более трех узлов датчика 113. Кроме узла датчика 102 система 101 приемника электромагнитного излучения также включает источник 110 контрольной формы волны, усилители сигнала 114 (каждый связан с соответствующим узлом датчика 113), систему 115 сбора данных (DAQ) и систему обработки данных 116, такую как компьютер. По меньшей мере в некоторых примерах вариантов осуществления источник 110 контрольной формы волны, система 115 сбора данных (DAQ) и система обработки данных 116 могут быть расположены в летательном аппарате 28 и могут быть соединены с узлом датчика 102 экранированными линиями связи, которые проходят по буксирному тросу 15 и поддерживающим канатам 16. Усилители 114 могут быть физически расположены рядом с узлом датчика 102 или на нем, чтобы уменьшить попадание предусилительного шума в сигналы, получаемые узлами датчиков 113 приемника. В некоторых примерах вариантов осуществления данные могут быть собраны и сохранены в системе сбора данных 115 для передачи в систему обработки 116, которая удалена от летательного аппарата 28.

[0025] Со ссылкой на Фиг. 3, каждый узел датчика 113 включает калибровочную петлю 122 с калибровочными клеммами 128 (CAL+, CAL-) и петлю или основную

обмотку в форме датчика магнитной индукции 121, который имеет выходные клеммы 127 (OUT+, OUT-). Примеры вариантов осуществления узлов датчика 113 будут описаны более подробно ниже.

5 [0026] Со ссылкой на Фиг. 2 и 3, в нормальном рабочем режиме системы приемника 101 во время полета для геологической съемки с помощью системы ЗМПП 100 источник 110 контрольной формы волны отключен. Датчик магнитной индукции 121 каждого узла датчика магнитной индукции 113 отслеживает скорость изменения dB/dt магнитного поля, параллельного его оси чувствительности, создавая изменяющийся во времени сигнал напряжения, пропорциональный dB/dt между его выходными клеммами OUT+ и OUT-. Каждый такой сигнал обрабатывается усилителем 114, связанным с каждым 10 узлом датчика магнитной индукции 113, затем преобразуется в цифровую временную последовательность и регистрируется системой сбора данных (DAQ) 115. В системе с несколькими датчиками цифровые временные последовательности от всех входов IN1, IN2 и IN3 системы сбора данных 115 регистрируются синхронно друг с другом. В 15 некоторых вариантах осуществления усилители 114 могут отсутствовать. В некоторых примерах вариантов осуществления один узел датчика 113 может быть конфигурирован для отслеживания скорости изменения dI/dt тока в петле передатчика 104 вместо dB/dt магнитного поля.

[0027] Таким образом, в нормальном рабочем режиме узлы датчиков 113 принимают 20 вторичные ответные сигналы земли, и полученные данные регистрируются системой сбора данных 115. В одном примере варианта осуществления, в дополнение к нормальному рабочему режиму, система приемника 101 также конфигурирована для работы в режиме калибровки. Режим калибровки может быть выполнен, например, на земле во время настройки системы съемки 100 в месте геофизической съемки, и 25 полученные данные калибровки могут быть использованы для всего набора данных съемки. В некоторых примерах вариантов осуществления калибровка может выполняться с некоторой периодичностью, например, еженедельно или каждое утро. В некоторых вариантах осуществления режим калибровки может быть запущен оператором в полете в начале съемки или с некоторой периодичностью во время съемки. 30 В некоторых примерах вариантов осуществления режим калибровки может быть частью специального калибровочного полета или частью полета, которая включает период калибровки и период нормальной работы. Альтернативно, режим калибровки может автоматически запускаться системой DAQ 115 или системой обработки 116 в начале полета для съемки или с некоторой периодичностью во время съемки при возникновении 35 определенных событий, таких как одно или больше из истечения периода времени или порогового изменения в одном или нескольких отслеживаемых состояниях окружающей среды, таких как температура, давление и конденсация.

[0028] В режиме калибровки источник 110 контрольной формы волны генерирует известную форму волны напряжения 111, которая содержит компоненты на нескольких 40 частотах. В некоторых вариантах осуществления, например, форма волны 111 является прямоугольной со скважностью 1 и содержит компоненты на всех нечетных гармониках ее основной частоты. В некоторых вариантах осуществления контрольная форма волны 111 может быть получена из генератора псевдослучайных последовательностей (PRSG) 210. В показанном варианте осуществления предусмотрен синхронизирующий сигнал между системой DAQ 115 и источником 110 контрольной формы волны, так что форма 45 волны 111 синхронизируется с системой DAQ 115, что позволяет определить фазовое отношение сигналов датчика, зарегистрированных системой DAQ 115, и контрольным сигналом формы волны 111. В некоторых вариантах осуществления синхронизирующий

сигнал получают из внешнего источника, такого как GPS-приемник, и вводят его как в источник 110 контрольной формы волны, так и в систему DAQ 115. В некоторых вариантах осуществления контрольную форму волны 111 вводят непосредственно в дополнительный вход системы DAQ 115, чтобы определить фазовое отношение.

5 [0029] В режиме калибровки известная форма волны 111 напряжения преобразуется в известную форму волны тока I_c резистором 112. Значение резистора выбирают так, чтобы оно было намного больше индуктивного сопротивления калибровочной петли на самой высокой частоте, для которой необходимы результаты калибровки. Ток известной формы волны I_c тока проходит через калибровочные петли 122 (ФИГ. 3) 10 каждого из узлов датчика магнитной индукции 113, которые в показанном варианте осуществления соединены последовательно. Каждая калибровочная петля 122 создает изменяющееся во времени магнитное поле пропорционально форме волны I_c тока. Эти магнитные поля, в свою очередь, создают сигналы на выходных клеммах OUT+, OUT- 15 каждого узла датчика 113. Эти сигналы обрабатываются усилителями 114 и регистрируются системой DAQ 115. Зарегистрированные формы волны обрабатываются компьютером 116, чтобы определить объединенный ответный сигнал каждого узла датчика 113, соответствующий ему усилитель 114 и связанный с ним канал системы DAQ 115. В разных вариантах осуществления эта обработка выполняется с 20 использованием временных или частотных методов. В других вариантах осуществления можно использовать другой тип или конфигурацию для получения калибровочной формы волны тока I_c . В некоторых вариантах осуществления, например, для каждого узла датчика 113 предусмотрен отдельный источник тока.

[0030] Каждый узел датчика 113, каждый усилитель 114 и каждый канал IN1, IN2 и 25 IN3 системы DAQ 115 формирует уникальный канал для датчика в системе с ответным сигналом, который изменяется вместе с частотой. При работе в описанном режиме калибровки объединенный ответный сигнал каждого канала для датчика во всей системе может быть определен компьютером 116. После этого, когда сигналы получены в нормальном рабочем режиме, ответный сигнал для каждого канала датчика, который 30 определен в режиме калибровки, используется компьютером 116 для удаления влияния узла датчика 113, усилителя 114 и системы DAQ из сигнала для этого конкретного канала датчика, как будет более подробно описано ниже. Это позволяет более точно определять ответный сигнал земли.

[0031] Снова со ссылкой на Фиг. 3, теперь будет более подробно объяснен пример 35 варианта осуществления катушки с воздушным сердечником для узла датчика магнитной индукции 113 узла приемника 102. Узел датчика 113 включает датчик магнитной индукции 121 в форме катушки с воздушным сердечником, который представляет собой основную обмотку из нескольких витков изолированного электрического провода вокруг центральной области 123. Хотя на Фиг. 3 показаны как пример четыре круглых 40 витка основной обмотки датчика 121 с воздушным сердечником, в некоторых практических вариантах осуществления могут быть использованы, например, 100-200 витков с общей осью чувствительности, причем диаметр 124 каждого витка составляет от 1 м до 8 м.

Датчик 121 может быть некруглым - например, в некоторых вариантах осуществления 45 витки многоугольные или эллиптические.

[0032] Специалисты в данной области техники поймут, что чувствительность и фазовый сдвиг выхода обмотки петли датчика относительно dB/dt окружающего магнитного поля могут быть определены путем калибровки обмотки в однородном

магнитном поле с точно известной амплитудой и формой волны. Однако для этого требуется калибровочная обмотка, которая больше калибруемой обмотки, что трудно сделать во многих полевых ситуациях.

[0033] На низких частотах ответный сигнал обмотки датчика 121 на магнитное поле составляет $A_e \text{ dB/dt}$, где A_e - "эффективная область" датчика 121, которая является суммой областей, окруженных всеми витками обмотки, проецированной на плоскость, перпендикулярную направлению вектора магнитного поля. Таким образом, чувствительность обмотки можно точно вычислить по размерам и числу витков обмотки без необходимости в данных электрических измерений. На низких частотах чувствительность обмотки является эффективной областью A_e , и фазового сдвига между dB/dt и выходным сигналом обмотки датчика 121 нет. Этот метод является точным для частот сигналов, которые намного меньше чем собственная частота обмотки и ширина полосы частот усилителя 114 и системы DAQ 115. Также, частота сигнала должна быть такой, чтобы входной импеданс усилителя 114 был намного больше чем импеданс обмотки.

[0034] Для того, чтобы определить чувствительность обмотки датчика 121, связанного с ним усилителя 114 и системы DAQ 115 на низких частотах, обмотка может быть помещена в однородное магнитное поле с известными амплитудой и формой волны. Такое поле может быть создано, например, калибровочной обмоткой в форме "катушки Гельмгольца" с диаметром и длиной, значительно большими чем у испытываемой обмотки, или петель с диаметром или шириной в несколько раз больше чем у испытываемой обмотки. Как сказано выше, такая конфигурация может быть непрактичной, и, соответственно, в настоящем документе описаны примеры вариантов осуществления, в которых может быть применена калибровочная петля, которая сопоставима по размерам с петлей датчика.

[0035] В этой связи, на Фиг. 3 показана калибровочная петля 122, которая сопоставима по размеру с основной обмоткой датчика 121. Из-за ее относительно малого размера, калибровочная петля 122 не создает однородное магнитное поле в объеме, занимаемом основной обмоткой датчика 121. Поле, которое в любой точке создает калибровочная петля 122, будет значительно изменяться вместе с небольшими изменениями в размерах или конфигурации петли, и, поэтому, не может быть использовано для точного измерения чувствительности основной обмотки датчика 121. Однако мгновенное магнитное поле, создаваемое калибровочной петлей 122 в любой точке, зависит только от тока в петле 122, независимо от частоты. Поэтому относительная амплитуда и фазовый сдвиг основной обмотки петли датчика, измеренные в частотной области как коэффициент относительно ее ответного сигнала на выбранной низкой частоте, могут быть определены путем использования ответного сигнала на известный ток I_c , поданный на калибровочную петлю 122. Кроме того, этот коэффициент и фазовый сдвиг по существу не зависят от конфигурации или размеров обмотки калибровочной петли при условии, что на все витки основной обмотки датчика 121 действует по существу одинаковое поле.

[0036] В примерах вариантов осуществления калибровочная петля 122 обычно представляет собой один виток или очень малое число витков. Одной причиной использования одного витка или очень малого числа витков является минимизация индуктивности калибровочной обмотки, чтобы форма волны тока являлась репликой формы волны напряжения, подаваемого через резистор 112 (т.е. чтобы она определялась по существу сопротивлением этого резистора, и чтобы влияние индуктивности было пренебрежимо малым). В вариантах осуществления, где калибровочная обмотка имеет

только один виток (или очень мало витков), магнитное поле, которая она создает, может быть слабым, так что окружающий магнитный шум от искусственных или естественных источников может влиять на формы волны, регистрируемые во время калибровки. Это явление можно уменьшить путем сбора данных по многим циклам формы волны калибровки и "наложения" (усреднения) зарегистрированной формы волны в системе DAQ 115 в компьютере 116.

[0037] В некоторых применениях точность вышеупомянутого коэффициента может быть снижена, если калибровочная петля 122 расположена достаточно близко к основной обмотке датчика 121, в результате чего существуют значительные различия между потоком, проходящим через разные витки основной обмотки. Соответственно, в некоторых применениях точность может быть повышена, если предусмотреть разделительное расстояние 126 между основной обмоткой датчика 121 и калибровочной петлей 122, которое было бы больше чем ширина 125 жгута проводов, составляющего витки основной обмотки датчика 121.

[0038] Также, при измерениях во временной области форма волны напряжения в основной обмотке петли 121 датчика, создаваемого формой волны тока I_c в обмотке калибровочной петли 122, будет отличаться только на амплитудный коэффициент от формы волны, которая была бы создана большой калибровочной обмоткой, создающей однородное поле, такой как в примере с катушкой Гельмгольца, описанном выше.

[0039] На Фиг. 3 калибровочная петля 122 схематически показана лежащей в одной плоскости с датчиком 121 и с диаметром больше чем у датчика 121, так что калибровочная петля 122 отделена некоторым радиальным расстоянием 126 от датчика 121. На Фиг. 4 показан альтернативный вариант осуществления датчика приемника, который идентичен узлу датчика 113 приемника с Фиг. 3 за тем исключением, что калибровочная петля 122 имеет по существу одинаковый диаметр 152 с основной обмоткой датчика 121, будучи лежащей в плоскости, перпендикулярной оси основной обмотки, но отделенной осевым расстоянием 150 от основной обмотки. В некоторых вариантах осуществления, таких как показанный на Фиг. 5, калибровочная петля 122 временно прикреплена во время режима калибровки к внешней поверхности оболочки 154, которая закрывает основную обмотку датчика 121, так что калибровочная петля 122 проходит приблизительно параллельно виткам основной обмотки датчика 121.

[0040] Следует понять, что, поскольку ответный сигнал основной обмотки датчика 121 на низких частотах может быть вычислен по ее размерам, и амплитудный коэффициент и фазовый сдвиг на высоких частотах относительно ответного сигнала на низких частотах могут быть измерены с использованием небольшой калибровочной петли 122, ответный сигнал канала за пределами полезного диапазона частот каждого узла датчика 113 может быть определен путем объединения двух типов калибровки без необходимости в большой калибровочной обмотке. Соответственно, в примерах вариантов осуществления в режиме калибровки компьютер 116 конфигурирован на определение ответного сигнала канала для каждого канала датчика для более высоких частот, и затем, объединяя эти результаты с известной чувствительностью на низких частотах для каждого канала датчика, можно получить калибровочный коэффициент для конкретного канала датчика, который включает или одно из передаточной функции и импульсного ответного сигнала, или и то и другое в полезном диапазоне частот каждого узла датчика 113. В частности, в некоторых вариантах осуществления сначала вычисляют комплексное преобразование Фурье ответного сигнала на калибровочную форму волны в каждом канале, например, используя известные алгоритмы быстрого преобразования Фурье; затем его делят на комплексное преобразование Фурье

калибровочной формы волны тока 111; полученную функцию делят на величину этой функции на выбранной низкой частоте (например, на основной частоте калибровочной формы волны); и полученную функцию далее умножают на известную эффективную область A_e датчика, получая комплексную передаточную функцию, соотносящую сигнал, зарегистрированный в каждом канале в единицах напряжения, со скоростью изменения dB/dt магнитного поля; затем вычисляют обратное преобразование Фурье каждой передаточной функции, чтобы получить импульсный ответный сигнал. Данные, которые зарегистрированы в нормальном рабочем режиме системы приемника 101, затем корректируют, используя передаточную функцию и импульсный ответный сигнал, определенный как калибровочный коэффициент для соответствующего канала датчика во время режима калибровки. В результате этого калибровочная петля 122 не должна быть значительно больше по размеру чем датчик 121 и может быть сопоставима по размеру с ним.

[0041] Хотя датчики магнитной индукции 121 в узле приемника 102 были описаны выше как катушки с воздушным сердечником, в некоторых примерах вариантов осуществления один или несколько датчиков магнитной индукции 121 могут быть реализованы как датчики с ферромагнитным сердечником, чтобы узел приемника 102 включал только датчики с ферромагнитным сердечником или смесь датчиков с воздушным и ферромагнитным сердечником. Специалисты в данной области техники поймут, что другие типы датчиков, такие как датчики с ферромагнитным сердечником, могут обеспечивать стабильный ответный сигнал на низких частотах, так что эффективная область A_e может быть измерена на меньших частотных интервалах с использованием некоторого устройства, такого как катушка Гельмгольца или соленоидная калибровочная трубка, и объединена с более частыми измерениями ответного сигнала в широком диапазоне частот с использованием калибровочной петли, которая описана выше.

[0042] На Фиг. 6 показан еще один пример варианта осуществления калиброванной системы приемника электромагнитного излучения 101', которая включает трехосный узел датчика 102' (на Фиг. 6 показана одна петля 121 приемника из узла стремя петлями датчиков). Система приемника электромагнитного излучения 101' может быть использована в системе 100 для съемки методом ЗМПП и подобна системе 101, за исключением различий, которые очевидны из этого чертежа и станут понятными из последующего описания. Система 100 для съемки методом ЗМПП включает петлю передатчика 104 для передачи первичной магнитной формы волны и источник импульсов ЗМПП 130 для генерации формы волны. В системе приемника электромагнитного излучения 101' источник импульсов ЗМПП 130 также использован для реализации источника 110 контрольной формы волны, используемого в режиме калибровки.

[0043] В частности, в нормальном рабочем режиме выходной сигнал источника импульсов ЗМПП 130 проходит через датчик тока 131. Форма волны тока 139 передатчика регистрируется системой DAQ 115 и соединяется с петлей передатчика 104 (схематически показанной здесь как один виток, хотя в некоторых вариантах осуществления используются несколько витков) через переключатель соединителя 132. Ответный сигнал, включающий вторичный ответный сигнал земли детектируется датчиком 121 и регистрируется системой DAQ 140.

[0044] В режиме калибровки переключатель соединителя 132 используется для замены петли передатчика резистивной нагрузкой (136, 137). Та же форма волны тока 139, которая проходит через датчик тока 131, также проходит через резистивную нагрузку. Резистор 136 по значению меньше чем резисторы 137, так что форма волны напряжения

на резисторе 136 представляет собой уменьшенную по величине реплику тока, проходящего через датчик тока 131. Эта форма волны повторяется как форма волны тока низкой амплитуды резисторами 138 (которые выполняют такую же функцию, что и резистор 112 на Фиг. 2), которая проходит через калибровочную петлю 122. В этом примере варианта осуществления трехосный узел датчика 102' включает одну наружную калибровочную петлю 122, которая расположена приблизительно вокруг петель 121 датчиков в такой ориентации, что она генерирует магнитное поле в таком направлении, которое влияет на все три петли 121 датчика. В других вариантах осуществления последовательно подсоединенная калибровочная петля включена внутри в узел датчика 102' для каждой петли 121 приемника.

[0045] В варианте осуществления на Фиг. 6, форма волны тока 139, подаваемая на калибровочную петлю 122, является репликой формы волны тока, который проходит через трансформатор тока 131. (Резистор 136 может быть выбран так, чтобы минимизировать влияние паразитной емкости в кабеле между резистором 136 и резисторами 138.) Поэтому любое отклонение формы волны тока от идеальной или желательной калибровочной формы волны влияет как на калибровку канала датчика тока, так и на калибровку датчика приемника. Ответный сигнал земли получают из передаточной функции между формой волны в канале тока передатчика и каждого канала приемника. Ошибки в калибровку обоих каналов будут аннулировать друг друга, когда вычисляется эта передаточная функция.

[0046] Хотя система приемника 101 с Фиг. 2 и 3 была описана выше в контексте системы электромагнитной съемки с активным источником, система приемника 101 с Фиг. 2 и 3 может быть альтернативно применена к системе геологической съемки с пассивным источником, включая, например, системы, описанные в вышеупомянутых патентах и патентных заявках. Кроме того, системы приемника 101 и 101' могут быть использованы для не авиационной геологической съемки и, как сказано выше, могут иметь всего одну петлю датчика и более трех петель датчика.

[0047] Раскрытые выше конкретные варианты осуществления являются только иллюстративными и не должны рассматриваться как ограничения настоящего изобретения, поскольку изобретение может быть модифицировано и осуществлено на практике разными, но эквивалентными способами, очевидными специалистам в данной области техники, с использованием положений настоящего документа. Соответственно, вышеприведенное описание не предназначено для ограничения изобретения описанной здесь конкретной формой, но, напротив, предназначено для того, чтобы охватывать такие альтернативы, модификации и эквиваленты, которые могут быть включены в объем настоящего описания. Поэтому специалисты в данной области техники должны понимать, что они могут вносить разные изменения, замены и переделки, не нарушая объем прилагаемой формулы изобретения. Помимо этого, признаки из одного или нескольких из вышеописанных вариантов осуществления могут быть выбраны и объединены для создания альтернативных вариантов осуществления, состоящих из сочетания признаков, которые может быть не были явно описаны выше. Признаки, подходящие для таких объединений и частичных объединений, будут вполне очевидны специалистам в данной области техники после рассмотрения настоящей заявки в целом. Предмет изобретения, описанный в настоящем документе и в формуле изобретения, предназначен для охвата и включения всех подходящих изменений в технике.

(57) Формула изобретения

1. Система приемника электромагнитного излучения для геофизической съемки,

включающая:

датчик магнитной индукции для генерации сигналов, представляющих изменения в принятом магнитном поле;

5 источник формы волны для генерации контрольной формы волны, имеющей первый диапазон частот;

калибровочную петлю, располагаемую, по меньшей мере временно, рядом с датчиком магнитной индукции, чтобы генерировать ответный сигнал калибровки в датчике магнитной индукции при применении контрольной формы волны к калибровочной петле; и

10 систему обработки, конфигурированную для определения калибровочного коэффициента, включающего передаточную функцию и импульсный ответный сигнал, для применения к сигналам от датчика магнитной индукции, причем система обработки определяет калибровочный коэффициент в зависимости как от ответного калибровочного сигнала, так и от известной чувствительности датчика магнитной
15 индукции во втором диапазоне частот, при котором известная чувствительность соответствует эффективной площади датчика магнитной индукции, причем второй диапазон частот ниже первого диапазона частот.

2. Система по п. 1, отличающаяся тем, что передаточная функция находится в частотной области, а импульсный ответный сигнал - во временной области.

20 3. Система по п. 2, отличающаяся тем, что передаточную функцию и импульсный ответный сигнал получают в диапазоне частот датчика магнитной индукции, который соответствует данным, полученным во время геологической съемки.

4. Система по п. 1, отличающаяся тем, что калибровочная петля по существу одинакова по размеру с датчиком магнитной индукции.

25 5. Система по п. 1, отличающаяся тем, что система обработки конфигурирована для применения калибровочного коэффициента к сигналам, принятым от датчика магнитной индукции во время геологической съемки.

6. Система по п. 1, отличающаяся тем, что источник формы волны генерирует псевдослучайную прямоугольную форму волны тока.

30 7. Система по п. 1, включающая:

петлю передатчика для создания первичного электромагнитного поля в ответ на поданный на нее сигнал возбуждения, причем источник формы волны адаптирован для селективного применения сигнала возбуждения к петле передатчика и контрольной формы волны к калибровочной петле;

35 датчик тока, конфигурированный для измерения тока, генерируемого источником формы волны, причем система обработки реагирует на датчик тока.

8. Система по п. 1, отличающаяся тем, что система приемника включена в буксируемый узел для системы электромагнитной аэросъемки методом ЗМПП (TDEM) или в буксируемый узел для системы аэросъемки с пассивным источником.

40 9. Система по п. 1, включающая некоторое число датчиков магнитной индукции для генерации сигналов, представляющих изменения в магнитном поле, причем система обработки конфигурирована для определения уникального калибровочного коэффициента для применения к сигналам от каждого из датчиков магнитной индукции.

10. Система по п. 1, отличающаяся тем, что датчиком магнитной индукции является петля датчика с воздушным сердечником, и известную чувствительность петли датчика для второго диапазона частот определяют на основании физических размеров петли датчика с воздушным сердечником.

11. Способ калибровки системы приемника электромагнитного излучения для

геофизической съемки, отличающийся тем, что система приемника включает датчик магнитной индукции для генерации сигналов, представляющих изменения в принятом магнитном поле, источник формы волны для генерации контрольной формы волны и калибровочную петлю, располагаемую, по меньшей мере временно, рядом с датчиком магнитной индукции, причем способ включает:

5 измерение ответного сигнала калибровки от датчика магнитной индукции на контрольную форму волны, имеющую первый диапазон частот, которая подается на калибровочную петлю источником формы волны; и

10 определение калибровочного коэффициента для будущего применения к съемочным сигналам от датчика магнитной индукции, причем калибровочный коэффициент включает передаточную функцию и импульсный ответный сигнал и определяется в зависимости как от ответного калибровочного сигнала, так и от известной чувствительности датчика магнитной индукции во втором диапазоне частот, при котором известная чувствительность соответствует эффективной площади датчика магнитной индукции, причем второй диапазон частот ниже первого диапазона частот.

12. Способ по п. 11, отличающийся тем, что определение калибровочного коэффициента включает:

(a) вычисление комплексного преобразования Фурье ответного сигнала калибровки;
 (b) деление комплексного преобразования Фурье ответного сигнала калибровки на
 20 комплексное преобразование Фурье контрольной формы волны, чтобы получить первую функцию;

(c) определение величины первой функции на выбранной низкой частоте;

(d) деление первой функции на определенную величину, чтобы получить вторую функцию;

25 (e) умножение второй функции на эффективную область A_e датчика магнитной индукции для получения передаточной функции, соотносящей ответный сигнал калибровки со скоростью изменения dB/dt магнитного поля; и

(f) вычисление обратного преобразования Фурье для передаточной функции, чтобы получить импульсный ответный сигнал.

30 13. Способ по п. 12, отличающийся тем, что передаточную функцию и импульсный ответный сигнал получают в диапазоне частот датчика магнитной индукции, который соответствует данным, полученным во время геологической съемки.

14. Способ по п. 11, кроме того включающий применение калибровочного коэффициента к съемочным сигналам, принятым от датчика магнитной индукции во
 35 время геологической съемки.

15. Способ по п. 11, отличающийся тем, что контрольной формой волны является прямоугольная форма волны тока.

16. Способ по п. 11, отличающийся тем, что система приемника электромагнитного излучения включает петлю передатчика для создания первичного электромагнитного
 40 поля в ответ на поданный на нее сигнал возбуждения, и датчик тока, конфигурированный для измерения тока, генерируемого источником формы волны, причем источник формы волны адаптирован для селективного применения сигнала возбуждения к петле передатчика и контрольной формы волны к калибровочной петле, и причем калибровочный коэффициент определяют в зависимости от информации по
 45 измеренному току, полученной от датчика тока.

17. Способ по п. 14, отличающийся тем, что система приемника включена в буксируемый узел для системы электромагнитной аэросъемки методом ЗМПП (TDEM) или в буксируемый узел для системы аэросъемки с пассивным источником.

18. Система приемника электромагнитного излучения для геофизической съемки, включающая:

датчик магнитной индукции, имеющий известную чувствительность на низких частотах,

5 генератор контрольной формы волны тока,
калибровочную петлю, сопоставимую по размерам с датчиком, и
систему обработки для объединения данных измерений, полученных датчиком, когда
контрольная форма волны подается на калибровочную петлю с известной
чувствительностью на низких частотах датчика, чтобы получить передаточную функцию
10 и импульсный ответный сигнал в применимом диапазоне частот датчика.

19. Система приемника электромагнитного излучения по п. 18, отличающаяся тем, что система обработки конфигурирована для применения по меньшей мере одного из передаточной функции и импульсного ответного сигнала к данным измерений при съемке, полученным от датчика магнитной индукции во время геологической съемки.

15 20. Способ калибровки системы приемника электромагнитного излучения для геофизической съемки, включающий по меньшей мере один датчик магнитной индукции, для получения передаточной функции системы в частотной области и импульсный ответный сигнал системы во временной области, включающий:

определение низкочастотного ответного сигнала датчика путем вычислений на
20 основании размеров датчика,

генерацию известной формы волны тока, имеющей частотные компоненты, охватывающие полезный диапазон частот системы приемника электромагнитного излучения,

пропускание формы волны тока через по меньшей мере одну калибровочную петлю,
25 которая сопоставима по размеру с датчиком и расположена так, чтобы создавать магнитное поле в датчике,

регистрацию сигналов, генерируемых датчиком,

анализ зарегистрированных сигналов, чтобы определить, на нескольких частотах, отношение ответного сигнала датчика на этой частоте к низкочастотному ответному
30 сигналу,

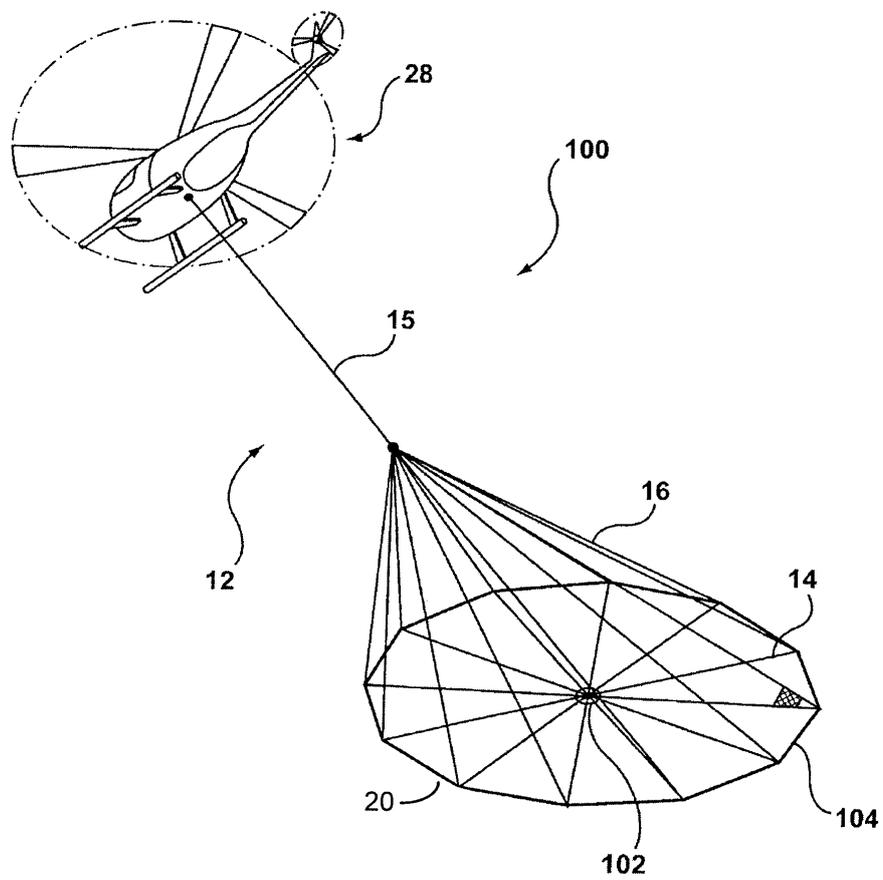
объединение этого отношения с известной чувствительностью датчика на низких частотах, чтобы получить передаточную функцию системы и импульсный ответный сигнал системы в этом полезном диапазоне частот системы.

35

40

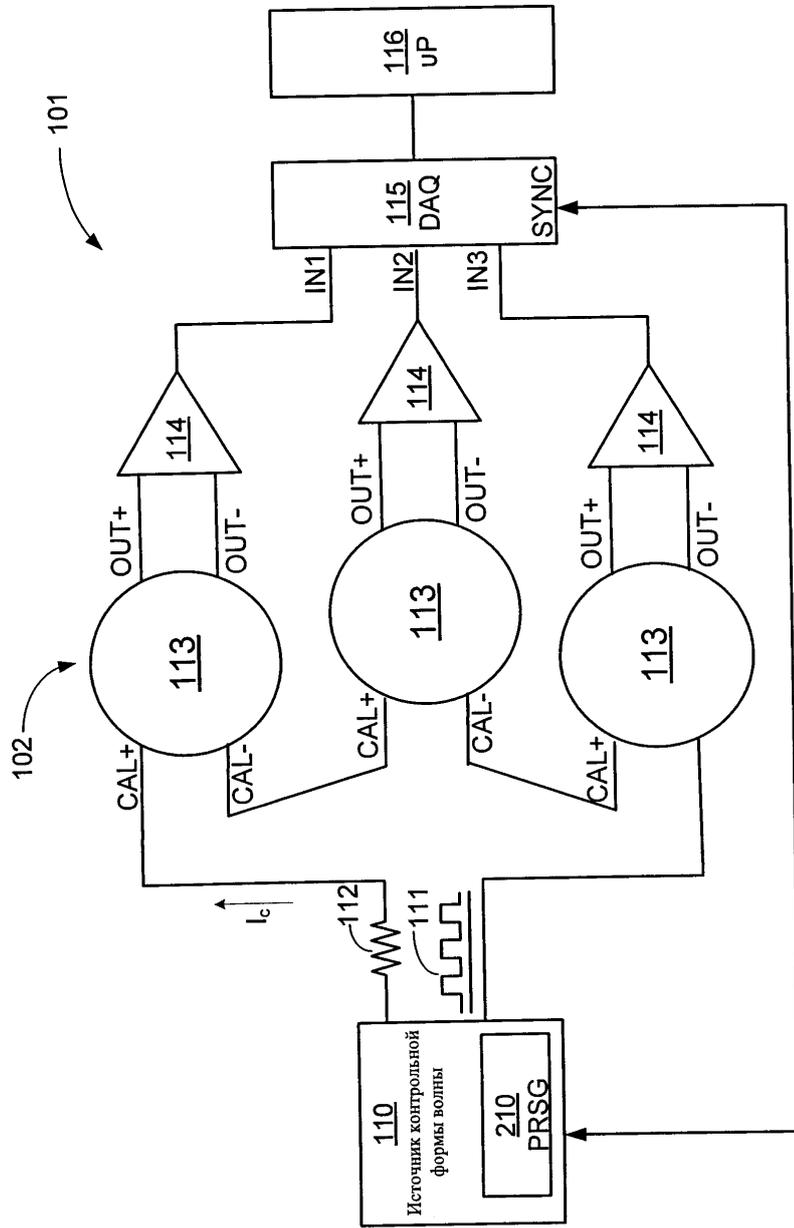
45

1

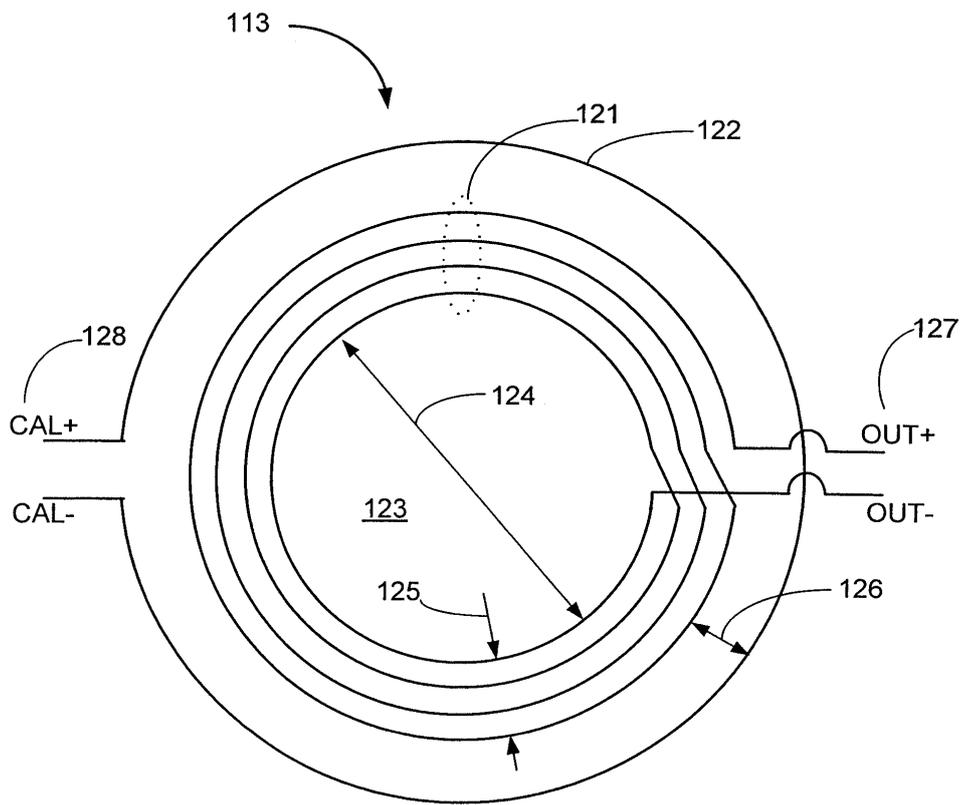


ФИГ. 1

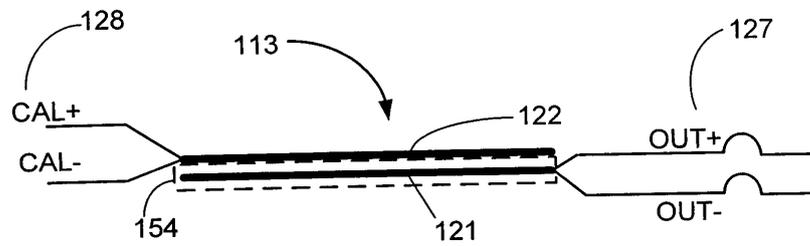
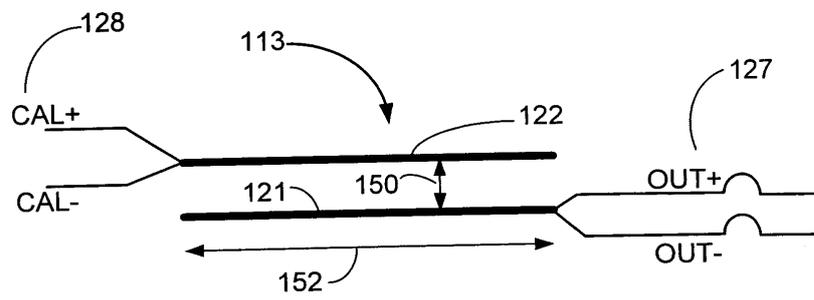
2

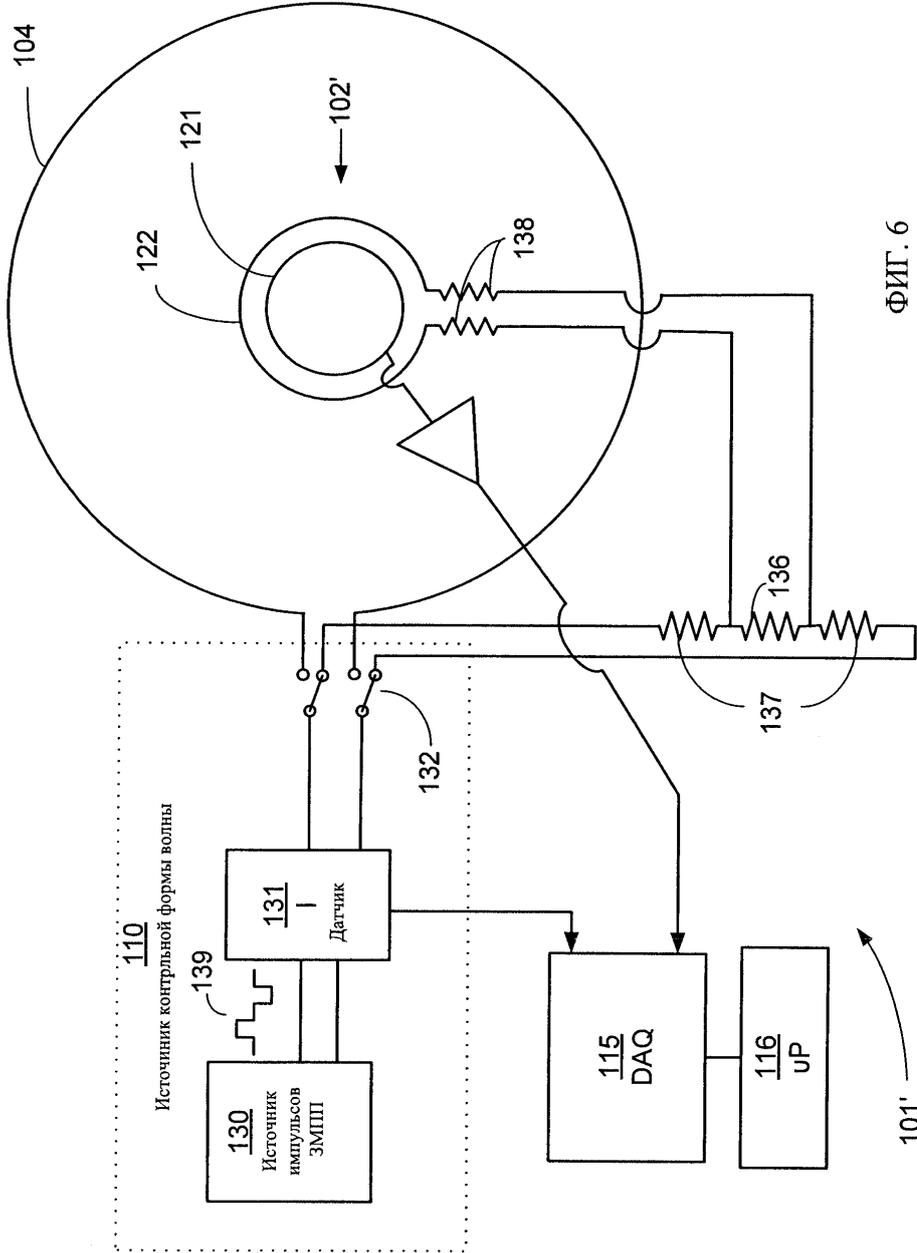


ФИГ. 2



ФИГ. 3





ФИГ. 6