

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2665692

### СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью  
"Конструкторское бюро "Физэлектронприбор" (RU)*

Авторы: *Сизиков Олег Креонидович (RU),  
Коннов Владимир Валерьевич (RU)*

Заявка № 2017140593

Приоритет изобретения 21 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 сентября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 21 ноября 2037 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

 Г.П. Ивлиев





(51) МПК  
*G01N 22/00* (2006.01)  
*G01R 27/26* (2006.01)  
*G01F 23/28* (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*G01N 22/00* (2006.01); *G01R 27/26* (2006.01); *G01F 23/28* (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017140593, 21.11.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
 21.11.2017

Дата регистрации:  
 04.09.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.11.2017

(45) Опубликовано: 04.09.2018 Бюл. № 25

Адрес для переписки:  
 443096, г. Самара, ул. Клиническая, 30, кв. 105,  
 Сизикову Олегу Креонидовичу

(72) Автор(ы):

Сизиков Олег Креонидович (RU),  
 Коннов Владимир Валерьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью  
 "Конструкторское бюро  
 "Физэлектронприбор" (RU)

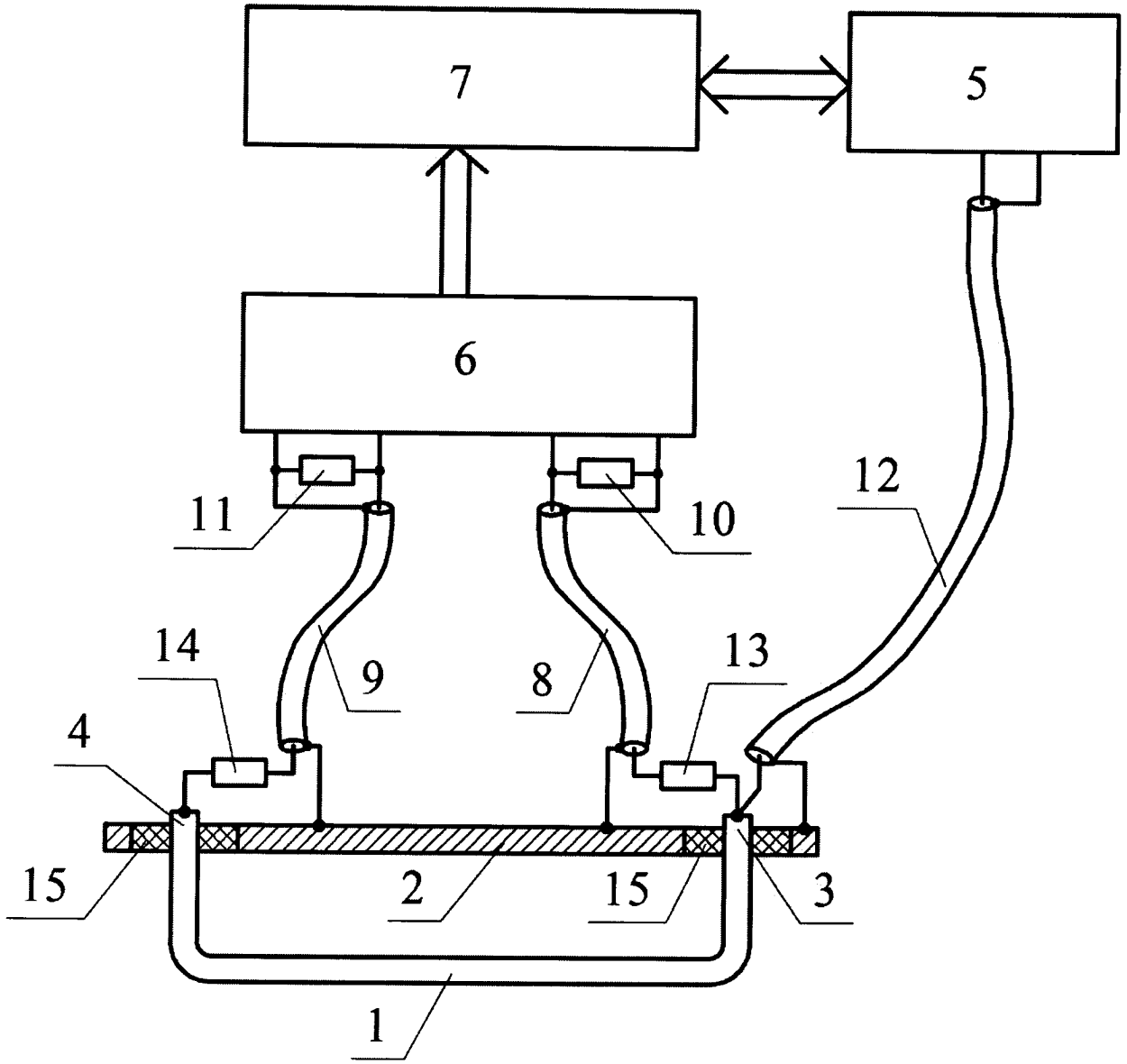
(56) Список документов, цитированных в отчете  
 о поиске: RU 2576552 C1, 10.03.2016. RU  
 2571301 C1, 20.12.2015. WO 2014077736 A1,  
 22.05.2014. CN 103091340 A, 08.05.2013. EP  
 0829007 B1, 18.09.2002. US 4862060 A,  
 29.08.1989.

(54) СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники и может быть использовано для измерения диэлектрической проницаемости и влажности сыпучих, пастообразных и жидких материалов с высокой электропроводностью, в т.ч. солевой пульпы, антрацита, руды, сырой нефти и нефтяных шламов. Способ основан на использовании детектора, преобразующего зондирующий высокочастотный сигнал, и применении датчика, выполненного в виде отрезка длинной линии передачи. От генератора, перестраиваемого в диапазоне частот, на вход датчика подаются зондирующий высокочастотный сигнал и измеряют частоты гармоник, характеризующиеся тем, что на этих частотах длина сигнального проводника датчика равна или кратна половине длины волны зондирующего сигнала в материале, заполняющем датчик. Частоты гармоник в предложенном способе определяют по минимуму напряжения на выходе детектора, выполненного в виде фазового

дискриминатора, у которого выходное напряжение достигает минимума, когда его входные сигналы синфазны или противофазны, при этом входы детектора подключены к входу и выходу датчика через отрезки коаксиального кабеля одинаковой электрической длины и согласованы на выходах. Предложено также устройство для измерения физических параметров материала, в котором осуществляют предложенный способ, при этом для измерений физических параметров жидкого материала в трубопроводах датчик устройства выполнен в виде трубы, внутри которой расположен сигнальный проводник, а для измерений физических параметров сыпучих материалов в бункерах и на конвейерах датчик выполнен в виде щита, на котором закреплен П-образный пруткок. Повышение точности измерений диэлектрических параметров и влажности контролируемого материала является техническим результатом изобретения. 2 н. и 15 з.п. ф-лы, 10 ил.



Фиг. 1

RU 2665692 C1

RU 2665692 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*G01N 22/00* (2006.01)  
*G01R 27/26* (2006.01)  
*G01F 23/28* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

*G01N 22/00* (2006.01); *G01R 27/26* (2006.01); *G01F 23/28* (2006.01)(21)(22) Application: **2017140593**, 21.11.2017(24) Effective date for property rights:  
21.11.2017Registration date:  
04.09.2018

Priority:

(22) Date of filing: 21.11.2017

(45) Date of publication: 04.09.2018 Bull. № 25

Mail address:

443096, g. Samara, ul. Klinicheskaya, 30, kv. 105,  
Sizikovu Olegu Kreonidovichu

(72) Inventor(s):

**Sizikov Oleg Kreonidovich (RU),  
Konnov Vladimir Valerevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu  
"Konstruktorskoe byuro "Fizelektronpribor"  
(RU)**(54) **METHOD AND DEVICE FOR MEASURING PHYSICAL PARAMETERS OF MATERIAL**

(57) Abstract:

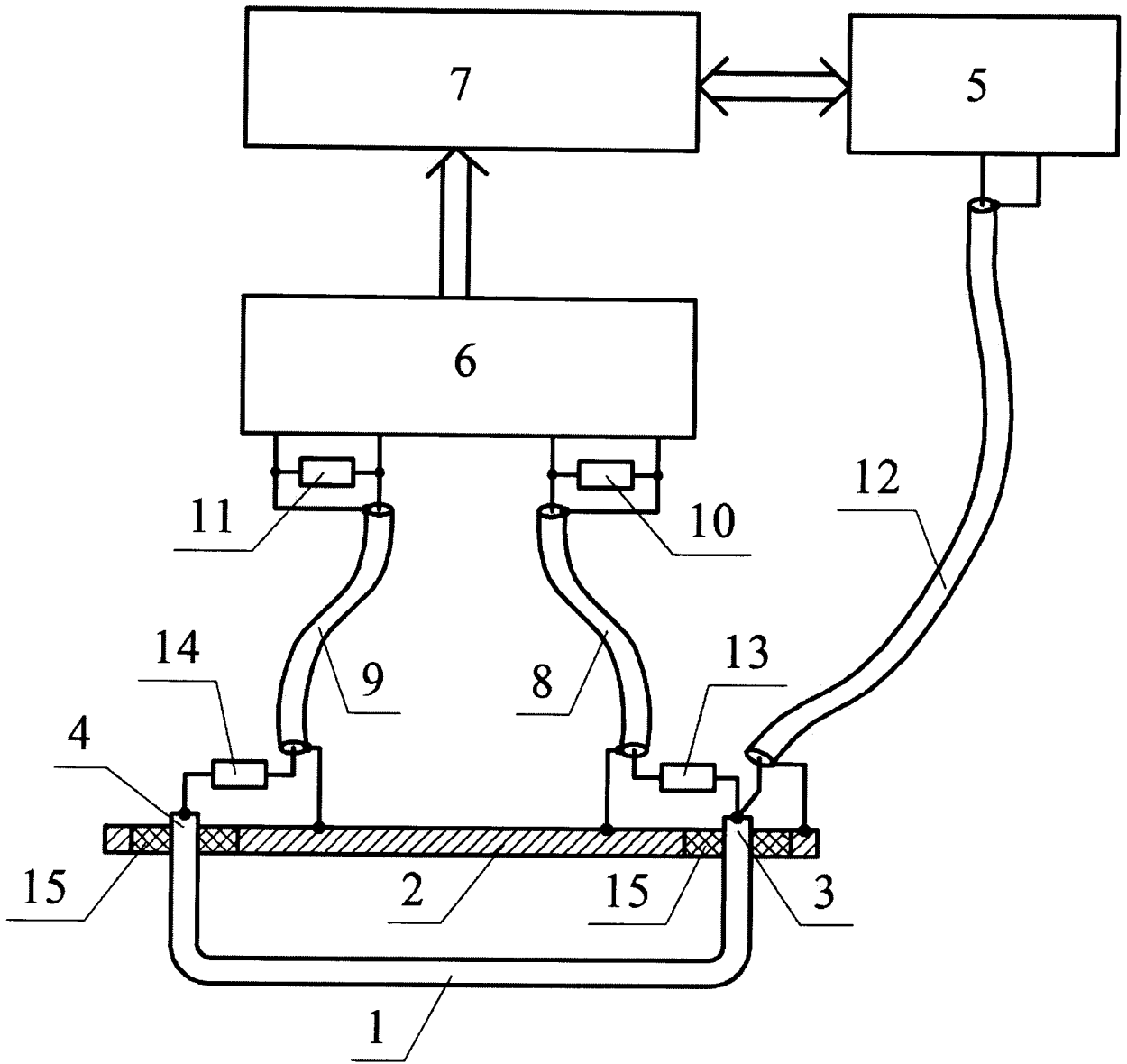
FIELD: electrical engineering.

SUBSTANCE: invention relates to the field of electrical engineering and can be used to measure the permittivity and humidity of loose, pasty and liquid materials with high electrical conductivity, incl. salt pulp, anthracite, ore, crude oil and oil sludge. Method is based on the use of a detector that converts a probing high-frequency signal and the use of a sensor configured as a length of a long transmission line. From a generator tunable in the frequency range, a probing high-frequency signal is applied to the sensor input and the frequencies of the harmonics are measured, characterized in that at these frequencies, the length of the signal conductor of the sensor is equal to or multiples of half the wavelength of the probe signal in the material filling the sensor. Frequencies of the harmonics in the proposed method are determined from the minimum voltage at the output of the detector, made in the form of a phase discriminator, in which the output

voltage reaches a minimum when its input signals are in phase or antiphase, while the detector inputs are connected to the sensor input and output through the lengths of a coaxial cable of the same electrical length and matched at the outputs. Apparatus is also provided for measuring the physical parameters of a material in which the proposed method is carried out, while for measuring physical parameters of liquid material in pipelines, the sensor of the device is made in the form of a pipe, inside which there is a signal conductor, and for measuring physical parameters of bulk materials in bins and on conveyors, the sensor is made in the form of a shield on which a U-shaped rod is fixed.

EFFECT: increase in the accuracy of measurements of the dielectric parameters and the moisture content of the controlled material is the technical result of the invention.

17 cl, 10 dwg



Фиг. 1

RU 2665692 C1

RU 2665692 C1

Техническое решение относится к измерительной технике и предназначено для измерения влажности материала, диэлектрической проницаемости, показателя преломления, концентрации смеси веществ, плотности.

Основное назначение предлагаемого технического решения - измерение влажности сыпучих, пастообразных и жидких материалов, обладающих высокой электропроводностью. К таким материалам, в частности, относятся:

- каменный уголь, в том числе антрацит;
- руда, железорудные концентраты;
- солевая пульпа (твердая поваренная соль в ее насыщенном растворе);
- иловые осадки сточных вод;
- шламы в производстве цемента;
- нефтяной шлам, сырая нефть;
- минеральные удобрения.

В качестве первого аналога выбран способ измерения физических параметров материала, описанный в патенте RU 2571301 C2 «Способ измерения физических параметров материала», опубл. 20.12.2015, и в заявке WO 2015041568 A1 «METHOD FOR MEASURING THE PHYSICAL PARAMETERS OF A MATERIAL», опубл. 26.03.2015. В указанном способе применяют датчик, выполненный в виде отрезка длинной линии передачи с сигнальным проводником и одним или несколькими экранными проводниками, датчик заполняют контролируемым материалом и на его вход подают зондирующий гармонический сигнал, который формируют генератором, генератор перестраивают в диапазоне частот и при перестройке измеряют напряжение на выходе детектора, преобразующего зондирующий высокочастотный сигнал в напряжение низкой частоты, и по минимальным значениям указанного напряжения определяют частоты гармоник, характеризующиеся тем, что на этих частотах длина сигнального проводника датчика равна или кратна половине длины волны (равна половине длины волны или равна длине волны или равна нескольким половинам длин волн) зондирующего сигнала в материале, заполняющем датчик, частоту гармоники, измеренную при заполнении датчика контролируемым материалом, сравнивают с частотой гармоники, измеренной при заполнении датчика воздухом, и по этим частотам или по их отношению определяют физические параметры материала, причем сигнальный проводник датчика на конце соединен с экранным проводником, а детектор подключен непосредственно к входу датчика.

Устройство (влажномер), выбранное в качестве первого аналога и осуществляющее указанный способ, описано в патентах RU 128333 U1 «Вланомер сыпучих материалов», опубл. 20.05.2013; RU 2572087 C2 «Вланомер», опубл. 27.12.2015; RU 2572819 C2 «Вланомер (варианты)», опубл. 20.01.2016; RU 2585255 C2 «Вланомер-диэлькометр (варианты)», опубл. 27.05.2016, а также в заявке EP 2921848 A1 «MOISTURE METER FOR BULK SOLIDS», опубл. 23.09.2015. Подробное описание известного устройства приведено также на сайтах: <http://fizepr.ru/>, <http://fizepr.com/>.

Известный вланомер содержит датчик, выполненный в виде отрезка длинной линии передачи с сигнальным проводником и одним или несколькими экранными проводниками, пространство между которыми предназначено для заполнения контролируемым материалом, подключенный к входу датчика генератор, формирующий высокочастотный гармонический зондирующий сигнал, причем генератор выполнен перестраиваемым в диапазоне частот и имеет вход управления для регулировки частоты, детектор, преобразующий высокочастотный зондирующий сигнал в напряжение низкой частоты, причем детектор включен между выходом генератора и входом датчика и

установлен непосредственно на входе датчика, устройство измерения и управления, к которому подключен вход управления генератора и выход детектора.

Особенностью приведенного способа и осуществляющего его устройства является прямой и абсолютный метод измерения диэлектрической проницаемости, основанный на измерении частот гармоник зондирующего сигнала и пересчете полученного значения диэлектрической проницаемости в значение влажности контролируемого материала. Указанные гармоники являются резонансными частотами отрезка длиной линии передачи датчика и характеризуются тем, что на этих частотах длина сигнального проводника датчика равна или кратна половине длины волны зондирующего электромагнитного сигнала в материале, заполняющем датчик. Критерием достижения частоты гармоники (частоты резонанса) является минимум напряжения на выходе детектора. В материалах, обладающих электропроводностью, зондирующий сигнал сильно ослабляется, добротность резонанса падает, расширяется полоса резонанса и в результате точность измерения влажности снижается. Для материалов с повышенной электропроводностью резонанс может вообще отсутствовать. Для обеспечения возможности измерения таких материалов, например, для измерения сырой нефти, в известных влагомерах применяют следующее решение: сигнальный проводник (зонд) датчика помещают в диэлектрическую оболочку - трубку. Но при высокой электропроводности материала, например, для насыщенного раствора соли, применение диэлектрической оболочки уже не решает проблему. Кроме того, использование диэлектрической трубки невозможно для ряда применений влагомера, так, например, при установке такого влагомера в поток кускового материала на ленте конвейера диэлектрическая оболочка разрушится. Введение диэлектрической оболочки зонда снижает чувствительность влагомера и точность измерений. Калибровочная характеристика такого влагомера определяется уже не только параметрами контролируемого материала, но и параметрами диэлектрической трубки: ее диаметром, толщиной стенок и диэлектрической проницаемостью материала трубки.

Еще одним недостатком известного устройства, выбранного в качестве первого аналога, является ограничение диапазона рабочих температур. В известном устройстве полупроводниковые диоды, входящие в состав детектора, подсоединены к входу датчика непосредственно и фактически имеют ту же температуру, что и контролируемый материал. Поэтому диапазон температур контролируемого материала в известном устройстве ограничен допустимыми температурами полупроводниковых диодов.

В качестве второго аналога выбраны способ и устройство измерения физических параметров материала, предложенные в патентах RU 2154816 C2 «Способ и устройство для непрерывного измерения влажности сыпучего продукта», опубл. 20.08.2000, и EP 0829007 B1 «PROCESS AND DEVICE FOR CONTINUOUSLY DETECTING THE DAMPNESS OF A BULK MATERIAL», опубл. 18.03.1998. В указанных патентах описан способ измерения влажности, в котором применяют датчик, выполненный в виде отрезка длиной линии передачи с сигнальным проводником и двумя экранными проводниками, датчик заполняют контролируемым материалом и на его вход подают зондирующий гармонический сигнал, который формируют генератором, измеряют разность фаз между фазой зондирующего сигнала, прошедшего через датчик и отрезки коаксиальной линии передачи, подсоединенные к датчику, и фазой сигнала, прошедшего через отрезок эталонной линии передачи, подключенный параллельно датчику, и по разности фаз определяют влажность материала.

Влагомер, осуществляющий указанный способ, содержит датчик, выполненный в виде отрезка длиной линии передачи с сигнальным и двумя экранными проводниками,

пространство между которыми предназначено для заполнения контролируемым материалом, причем экранные проводники образованы стенками металлического бункера, а сигнальный проводник выполнен в виде металлического прутка, который установлен между стенками бункера параллельно им, первый и второй отрезки коаксиальной линии передачи, подключенные, соответственно, к входу и выходу датчика, генератор высокочастотного гармонического зондирующего сигнала, подключенный к входу датчика через первый отрезок коаксиальной линии передачи, отрезок эталонной линии передачи, вход которого подключен к выходу генератора, фазовый детектор, к первому входу которого подключен через смеситель выход отрезка эталонной линии передачи, а ко второму входу фазового детектора подключен через второй смеситель выход второго отрезка коаксиальной линии передачи, устройство измерения и управления, к которому подключен выход детектора, причем на входе и выходе датчика установлены переходные рупоры для свободного от отражений согласования волнового сопротивления первого и второго отрезков коаксиальной линии с волновым сопротивлением линии передачи датчика, переходные рупоры на переходе к датчику закрыты слоем, прозрачным для зондирующего электромагнитного сигнала.

Данное техническое решение основано на измерении диэлектрической проницаемости, но применяемый способ измерения диэлектрической проницаемости - косвенный, результат измерения зависит от параметров отрезка эталонной линии передачи, соответственно, данный способ не позволяет достичь максимальной точности измерения.

Способ измерения влажности, основанный на измерении разности фаз между фазой зондирующего сигнала, прошедшего через контролируемый материал, и фазой сигнала, прошедшего через отрезок эталонной линии передачи, применяется во многих влагомерах, описанных, например, в монографии: Бензарь В.К., Техника СВЧ-влагометрии. - Минск: Высшая школа, 1974, 352 с. Второй аналог, как и технические решения, приведенные в указанной монографии, имеет следующий недостаток: суммарный фазовый сдвиг сигнала в датчике и подключенных к датчику отрезках линии передачи зависит не только от диэлектрической проницаемости материала, заполняющего датчик, но и от согласования волнового сопротивления линии передачи датчика с волновыми сопротивлениями подключенных к датчику отрезков линии передачи. Для разных контролируемых материалов, а также при изменении влажности контролируемого материала волновое сопротивление линии передачи датчика изменяется. Для уменьшения влияния волнового сопротивления датчика на измеряемую разность фаз во втором аналоге предложено на входе и выходе датчика установить согласующие рупоры, которые закрыты слоем, прозрачным для зондирующего электромагнитного сигнала. Но рупоры обеспечивают согласование в сравнительно узком диапазоне изменения волнового сопротивления и, кроме того, использование указанных рупоров возможно только для узкого круга задач.

В рассмотренных выше влагомерах влажность отсчитывают по величине измеренной фазы, поэтому во всем диапазоне изменения фазы от 0 до 360° фазовый детектор должен иметь стабильную и линейную характеристику преобразования фазы в выходное напряжение. Линейность преобразования детектора зависит от амплитуды его входных сигналов. В материалах, обладающих электропроводностью, зондирующий сигнал сильно ослабляется, это влияет на линейность характеристик фазового детектора. Фазовый сдвиг сигнала в таких материалах может многократно превышать 360°. Указанные факторы привели к тому, что известное техническое решение нашло лишь ограниченное применение и не используется для контроля материалов, обладающих



высокой электропроводностью.

В качестве прототипа выбраны способ и устройство измерения физических параметров материала, наиболее близкие по технической сущности к предлагаемому техническому решению, описанные в патентах RU 2576552 C1 «Способ и устройство измерения физических параметров материала», опубл. 10.03.2016; DE 212015000221 U1 «Messgerät für die physikalischen Parameter eines Materials»), опубл. 25.04.2017, и в заявке WO 2016043629 A1 «METHOD AND DEVICE FOR MEASURING THE PHYSICAL PARAMETERS OF A MATERIAL», опубл. 24.03.2016.

В известном способе, выбранном в качестве прототипа, применяют датчик, выполненный в виде отрезка длинной линии передачи с сигнальным проводником и одним или несколькими экранными проводниками, датчик заполняют контролируемым материалом и на его вход подают зондирующий высокочастотный гармонический сигнал, который формируют генератором, генератор перестраивают в диапазоне частот и при перестройке измеряют напряжение на выходе детектора, преобразующего высокочастотный зондирующий сигнал в напряжение низкой частоты, и по минимальным значениям указанного напряжения определяют частоты гармоник, характеризующиеся тем, что на этих частотах длина сигнального проводника датчика равна или кратна половине длины волны зондирующего сигнала в материале, заполняющем датчик, причем на вход детектора зондирующий сигнал подают с входа датчика через первый дополнительный отрезок линии передачи, в котором создают режим бегущих волн, частоту гармоник, измеренную при заполнении датчика контролируемым материалом, сравнивают с частотой гармоник, измеренной при заполнении датчика воздухом, и по этим частотам или по их отношению определяют физические параметры материала.

Устройство, выбранное в качестве прототипа и осуществляющее приведенный выше способ, содержит датчик, выполненный в виде отрезка длинной линии передачи с сигнальным проводником и одним или несколькими экранными проводниками, пространство между которыми предназначено для заполнения контролируемым материалом, подключенный к входу датчика генератор, формирующий высокочастотный гармонический зондирующий сигнал, причем генератор выполнен перестраиваемым в диапазоне частот и имеет вход управления для регулировки частоты, детектор, преобразующий высокочастотный зондирующий сигнал в напряжение низкой частоты, устройство измерения и управления, к которому подключен вход управления генератора и выход детектора, первый дополнительный отрезок двухпроводной линии передачи, вход указанного отрезка подключен к входу датчика, а его выход подключен к первому входу детектора, причем первый дополнительный отрезок линии передачи выполнен согласованным на выходе, подключенном к детектору, что обеспечено, например, подсоединением согласующего резистора параллельно выходу указанного отрезка, выход генератора подключен к входу датчика через входной отрезок линии передачи.

Как и для первого аналога, основой приведенного способа и осуществляющего его устройства является прямой и абсолютный метод измерения диэлектрической проницаемости, основанный на измерении частот гармоник зондирующего сигнала и пересчете полученного значения диэлектрической проницаемости в значение влажности контролируемого материала. Но для материалов, обладающих электропроводностью, данное техническое решение не позволяет получить высокую точность измерения. Причины, обуславливающие указанный недостаток, те же, что и для технического решения, выбранного в качестве первого аналога. Эти причины подробно описаны

выше, в разделе, в котором рассмотрен первый аналог.

Целью предлагаемого технического решения является повышение точности измерения физических параметров материалов, обладающих электропроводностью, в том числе материалов, имеющих абразивные свойства, а также сыпучих материалов с крупными фракциями.

Поставленная цель достигается тем, что в способе измерения физических параметров материала, в котором применяют датчик, выполненный в виде отрезка длинной линии передачи с сигнальным проводником и одним или несколькими экранными проводниками, датчик заполняют контролируемым материалом и на его вход подают зондирующий высокочастотный гармонический сигнал, который формируют генератором, генератор перестраивают в диапазоне частот и при перестройке измеряют напряжение на выходе детектора, преобразующего высокочастотный зондирующий сигнал в напряжение низкой частоты, и по минимальным значениям указанного напряжения определяют частоты гармоник, характеризующиеся тем, что на этих частотах длина сигнального проводника датчика равна или кратна половине длины волны зондирующего сигнала в материале, заполняющем датчик, причем на вход детектора зондирующий сигнал подают с входа датчика через первый дополнительный отрезок линии передачи, в котором создают режим бегущих волн, частоту гармоники, измеренную при заполнении датчика контролируемым материалом, сравнивают с частотой гармоники, измеренной при заполнении датчика воздухом, и по этим частотам или по их отношению определяют физические параметры материала, согласно предлагаемому техническому решению, частоты гармоник определяют посредством сравнения фазы зондирующего сигнала на входе датчика с фазой зондирующего сигнала на выходе датчика, сравнение фаз производят в детекторе, выполненном в виде фазового дискриминатора, у которого выходное напряжение достигает минимума, когда его входные сигналы или синфазны или противофазны, зондирующий сигнал с выхода датчика подают на второй вход детектора через введенный в состав влагомера второй дополнительный отрезок линии передачи, электрическая длина которого выбрана равной электрической длине первого дополнительного отрезка, причем во втором дополнительном отрезке создают режим бегущих волн. Упомянутые физические параметры материала представляют собой диэлектрическую проницаемость, влажность материала, концентрацию смеси веществ, плотность, показатель преломления материала.

В предложенном способе, также как в рассмотренных ранее первом аналоге и прототипе, обеспечивается прямой и абсолютный метод измерения диэлектрической проницаемости (показателя преломления), основанный на измерении частот гармоник зондирующего сигнала и пересчете полученного значения диэлектрической проницаемости в значение влажности контролируемого материала (плотности или концентрации).

Для сравнения: во втором аналоге измерение диэлектрической проницаемости - косвенное и общая ошибка измерения влажности определяется уже двумя факторами: ошибкой измерения диэлектрической проницаемости и ошибкой перевода диэлектрической проницаемости во влажность. В предлагаемом техническом решении ошибка измерения диэлектрической проницаемости сведена к минимуму и итоговая ошибка измерения влажности определяется лишь только одним фактором - точностью перевода в значение влажности измеренной диэлектрической проницаемости. Таким образом, предложенное техническое решение в принципе точнее известных решений, основанных на косвенном измерении диэлектрической проницаемости.

Поставленная цель достигается также тем, что в предложенном способе генератор

перестраивают в диапазоне частот дискретными шагами, на каждом шаге перестройки определяют напряжение на выходе детектора, и по частотной зависимости указанного напряжения, измеренной во всем диапазоне частот перестройки генератора, определяют частоты гармоник.

5       Поставленная цель достигается также тем, что в предложенном способе сравнивают уровни (амплитуды) зондирующего сигнала на входе и выходе датчика, по их отношению определяют диэлектрические потери в контролируемом материале и по полученному значению потерь уточняют измеряемые физические параметры.

10       Указанный способ реализуют следующим образом: по измеренному отношению частот гармоник определяют действительную составляющую показателя преломления материала; по отношению уровней зондирующего сигнала на входе и выходе датчика определяют мнимую составляющую показателя преломления; по двум найденным параметрам вычисляют комплексную диэлектрическую проницаемость и затем по ее значению определяют влажность материала (или другие физические параметры) с  
15       повышенной точностью. Предлагаемое решение, заключающееся в дополнительном измерении амплитуд сигнала, позволяет определить комплексную диэлектрическую проницаемость даже при высоком тангенсе диэлектрических потерь, превышающем единицу.

20       Применительно к устройству, осуществляющему предложенный способ, поставленная цель достигается тем, что в устройстве измерения физических параметров материала, содержащем датчик, выполненный в виде отрезка длинной линии передачи с сигнальным проводником и одним или несколькими экранными проводниками, пространство между которыми предназначено для заполнения контролируемым материалом, подключенный к входу датчика генератор, формирующий высокочастотный гармонический  
25       зондирующий сигнал, причем генератор выполнен перестраиваемым в диапазоне частот и имеет вход управления для регулировки частоты, детектор, преобразующий высокочастотный зондирующий сигнал в напряжение низкой частоты, устройство измерения и управления, к которому подключен вход управления генератора и выход детектора, первый дополнительный отрезок двухпроводной линии передачи, вход  
30       указанного отрезка подключен к входу датчика, а его выход подключен к первому входу детектора, причем первый дополнительный отрезок линии передачи выполнен согласованным на выходе, подключенном к детектору, что обеспечено, например, подсоединением согласующего резистора параллельно выходу указанного отрезка, выход генератора подключен к входу датчика или непосредственно или через входной  
35       отрезок линии передачи, согласно предлагаемому техническому решению, упомянутый детектор выполнен в виде фазового дискриминатора, у которого выходное напряжение достигает минимума, когда его входные высокочастотные сигналы синфазны или противофазны, введен второй дополнительный отрезок двухпроводной линии передачи, вход которого подключен к выходу датчика, а выход второго дополнительного отрезка  
40       подключен ко второму входу детектора, причем электрическая длина второго дополнительного отрезка равна электрической длине первого дополнительного отрезка и второй дополнительный отрезок линии передачи также выполнен согласованным на выходе, подключенном к детектору. В качестве двухпроводной линии для указанных дополнительных отрезков и входного отрезка может быть применен коаксиальный  
45       кабель.

Поставленная цель достигается также тем, что генератор зондирующего сигнала выполнен в виде синтезатора, который формирует частоту зондирующего сигнала по цифровому коду, задаваемому устройством измерения и управления, а устройство

измерения и управления содержит процессор, который вычисляет физические параметры контролируемого материала по значениям частот гармоник зондирующего сигнала. Частоты гармоник определяют по минимуму напряжения на выходе детектора следующим образом: снимают весь спектр выходного сигнала детектора, представляющий собой частотную зависимость напряжения детектора во всем диапазоне частот перестройки генератора, затем в этом спектре находят минимумы и определяют значения частот в этих минимумах.

Поставленная цель достигается также тем, что в состав устройства измерения и управления введен усилитель с нелинейной амплитудной характеристикой, обеспечивающий усиление выходного напряжения детектора таким образом, что напряжение низкого уровня усиливается, а напряжение высокого уровня ограничивается. При таком преобразовании выходного сигнала детектора пики минимумов в спектре обостряются, что позволяет повысить точность измерения положения минимума на оси частот.

Поставленная цель достигается также тем, что в состав детектора включено устройство для измерения и вычисления отношения уровней зондирующего сигнала на входе и выходе датчика, выход указанного устройства подключен к устройству измерения и управления, причем процессор устройства измерения и управления вычисляет физические параметры материала по значениям частот гармоник и по величине отношения уровней зондирующего сигнала на входе и выходе датчика.

Поставленная цель достигается также тем, что подключение первого дополнительного отрезка линии передачи к входу датчика произведено через делитель мощности, выполненный, например, в виде резистора, который включен между входом датчика и входом первого дополнительного отрезка линии передачи. Указанный резистор образует с входным сопротивлением первого дополнительного отрезка делитель напряжения. Делитель мощности выполняет две функции:

- обеспечивает развязку входных цепей датчика от первого дополнительного отрезка, тем самым исключает влияние этого отрезка на фазу сигнала на выходе датчика;
- уменьшает мощность сигнала на втором входе детектора.

Необходимость уменьшения мощности сигнала на втором входе детектора обусловлена тем, что для измерения материалов с высокой проводимостью приходится сильно увеличить мощность генератора. С помощью делителя мощности ограничивают уровень сигнала на втором входе детектора на допустимом уровне.

Поставленная цель достигается также тем, что экраный проводник датчика выполнен в виде трубы, а сигнальный проводник датчика выполнен в виде металлического прутка, который расположен внутри трубы или параллельно ее оси или перпендикулярно к оси трубы вдоль диаметра, на концах сигнальный проводник закреплен в электропроводах, содержащих диэлектрический изолятор, каждый из электропроводов расположен либо на боковой поверхности трубы, либо на торцевой заглушке трубы, соответственно, сигнальный проводник датчика имеет либо П-образную форму, либо Г-образную форму, либо форму прямого отрезка, входной и дополнительные отрезки линии передачи выполнены из коаксиального кабеля и подключены к сигнальному проводнику датчика через указанные электропроводы.

Поставленная цель достигается также тем, что на внешней поверхности трубы соосно с электропроводами установлены два металлических корпуса, выполненные в виде стаканов с отверстием в дне, причем, электропроводы установлены в указанных отверстиях, стаканы соединены металлическими трубками с дополнительным корпусом, внутри которого установлен детектор, дополнительные отрезки линии передачи

размещены в указанных трубках.

Поставленная цель достигается также тем, что экранированный проводник датчика выполнен в виде щита, а сигнальный проводник датчика выполнен в виде металлического прутка, который установлен на щите и имеет П-образную форму, на концах сигнальный проводник закреплен в электропроводах, содержащих диэлектрический изолятор, указанные электропроводы закреплены в щите, входной и дополнительные отрезки линии передачи выполнены из коаксиального кабеля и подключены к сигнальному проводнику датчика через указанные электропроводы.

Поставленная цель достигается также тем, что на внешней поверхности щита соосно с электропроводами установлены два металлических корпуса, выполненные в виде стаканов с отверстием в дне, причем электропроводы установлены в указанных отверстиях, внутри первого металлического корпуса, в котором находится выход сигнального проводника датчика, установлен детектор, стаканы соединены металлической трубкой, внутри которой размещен первый дополнительный отрезок линии передачи, второй дополнительный отрезок линии передачи размещен в первом металлическом корпусе.

Поставленная цель достигается также тем, что проводники входного и дополнительных отрезков линии передачи и проводники датчика выполнены из металла, устойчивого к воздействию высоких температур, а электрическое соединение указанных проводников выполнено с помощью высокотемпературного припоя.

Поставленная цель достигается также тем, что в сигнальном проводнике, выполненном в виде металлического прутка, на его торце выполнено отверстие вдоль оси прутка, внутри отверстия установлен датчик температуры, например, термопара, провода датчика температуры подключены к устройству измерения и управления, причем на выходе из отверстия в прутке указанные провода намотаны на ферритовое кольцо. Провода датчика температуры выполнены изолированными от сигнального и экранированных проводников. Благодаря намотке проводов на ферритовое кольцо они образуют дроссель, который имеет высокое сопротивление на частотах зондирующего сигнала, этим устраняется влияние проводов термодатчика на зондирующий сигнал. Измерение температуры контролируемого материала позволяет повысить точность измерения его влажности, так как диэлектрическая проницаемость зависит не только от содержания в материале воды, но и от его температуры.

Поставленная цель достигается также тем, что экранированный и сигнальный проводники датчика выполнены в виде параллельных стержней, причем экранированный проводник может содержать либо один стержень, либо несколько параллельных стержней, в одном из которых выполнено вдоль его длины сквозное отверстие, все стержни закреплены своими концами на первом и втором металлических основаниях, причем стержни, образующие экранированный проводник, закреплены на основаниях так, что образуют с основаниями электрический контакт, сигнальный проводник закреплен своими концами на основаниях посредством электропроводов, содержащих диэлектрический изолятор, входной и дополнительные отрезки линии передачи выполнены из коаксиального кабеля и подключены к сигнальному проводнику датчика через указанные электропроводы, при этом входной и первый дополнительный отрезки линии передачи подключены к входу датчика со стороны первого основания, второй дополнительный отрезок линии передачи подключен к выходу датчика со стороны второго металлического основания и выведен на сторону первого основания через упомянутое отверстие в стержне.

Поставленная цель достигается также тем, что экранированный проводник датчика выполнен в виде трубы с прорезями в ее стенках, а сигнальный проводник датчика

выполнен в виде металлической трубки, которая расположена внутри упомянутой трубы параллельно ее оси, на концах сигнальный проводник закреплен в электропроводах, содержащих диэлектрический изолятор, электропроводы расположены на торцевых стенках трубы, подключение входного и дополнительных отрезков линии передачи к

5 сигнальному проводнику датчика произведено через указанные электропроводы, входной и дополнительные отрезки линии передачи выполнены из коаксиального кабеля, второй дополнительный отрезок линии передачи, подключенный к выходу датчика, размещен

10 внутри трубки, образующей сигнальный проводник, на выходе из трубки со стороны входа датчика указанный отрезок коаксиального кабеля намотан на ферритовое кольцо.

Сущность предлагаемого технического решения поясняется фиг. 1-10.

На фиг. 1-8 показана конструкция устройства измерения физических параметров материала в разных вариантах исполнения. На фиг. 9 и 10 показаны спектры выходного сигнала детектора и соответствующие им возможные варианты электрических схем детектора.

15 Предложенное устройство измерения физических параметров материала характеризуется следующими признаками. Устройство измерения (влагомер) содержит датчик, выполненный в виде отрезка длинной линии передачи, образованной сигнальным проводником 1 и одним или несколькими экранными проводниками 2. Пространство между проводниками 1 и 2 предназначено для заполнения контролируемым материалом.

20 Датчик содержит вход 3 и выход 4. Вход 3 датчика подключен к выходу генератора 5 высокочастотного гармонического зондирующего сигнала, причем генератор выполнен перестраиваемым в диапазоне частот и имеет вход управления для регулировки частоты. Предложенное устройство также содержит детектор 6 и устройство 7 измерения и управления, к которому подключен вход управления генератора 5 и выход детектора

25 6. Детектор 6 выполнен в виде фазового дискриминатора. Детектор 6 преобразует высокочастотный зондирующий сигнал, снимаемый с входа 3 и выхода 4 датчика, в выходное напряжение низкой частоты, причем выходное напряжение достигает минимума когда входные сигналы детектора 6 синфазны или противофазны. Детектор 6 подключен к датчику с помощью двух отрезков 8, 9 двухпроводной линии передачи,

30 в качестве которой, как показано на фиг. 1-10, применен коаксиальный кабель. При этом первый вход детектора 6 соединен с входом 3 датчика посредством первого отрезка 8 коаксиального кабеля, второй вход детектора 6 соединен с выходом 4 датчика посредством второго отрезка 9. Дополнительные отрезки 8 и 9 имеют одинаковую электрическую длину. Отрезки 8, 9 на выходах, подсоединенных к входам детектора

35 6, выполнены согласованными, что достигается, например, подсоединением согласующих резисторов 10 и 11 параллельно выходам указанных отрезков. Сопротивление резисторов 10, 11 выбрано таким образом, что сопротивление входов детектора 6 вместе с подключенными к ним параллельно указанными резисторами, было равно волновому сопротивлению коаксиальных кабелей, из которых выполнены

40 отрезки 8, 9. Указанное согласование обеспечивает для передаваемых по дополнительным отрезкам 8, 9 сигналов режим бегущих волн. В результате отношение уровней сигналов на входах и выходах отрезков 8, 9 остается неизменным, а при одинаковой электрической длине и разность фаз сигналов также сохраняется.

Выход генератора 5 подключен к входу 3 датчика или непосредственно или через

45 входной отрезок 12 линии передачи, в качестве которой также может быть использован коаксиальный кабель. Подключение входного отрезка 12 и дополнительных отрезков 8, 9 выполнено следующим образом: сигнальные проводники отрезков 8, 9, 12 соединены с сигнальным проводником 1 датчика, экранные проводники указанных отрезков

соединены с экранным проводником 2 датчика. Подключение первого отрезка 8 к входу 3 датчика может быть произведено через резистор 13, выполняющий функцию делителя мощности. Коэффициент деления напряжения этого делителя определяется следующим выражением:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{\rho_{cab}}{R + \rho_{cab}}, \quad (1)$$

где  $U_{in}$  - напряжение на входе делителя;

$U_{out}$  - напряжение на выходе делителя;

$\rho_{cab}$  - волновое сопротивление отрезка 8 линии передачи;

$R$  - сопротивление резистора 13.

Для выравнивания электрических длин каналов, образованных первым и вторым дополнительными отрезками 8, 9, вход второго дополнительного отрезка 9 может быть подсоединен к выходу 4 датчика через дополнительный резистор 14, аналогичный по размерам резистору 13 на входе первого отрезка 8, но сопротивление резистора 14 должно быть мало или равно нулю.

Как показано на фиг. 1-8, сигнальный проводник 1 выполнен в виде металлического прутка, который на концах закреплен в электропроводах 15, содержащих диэлектрический изолятор. Электропроводы 15 служат для герметизации датчика и для передачи зондирующего сигнала в область, занимаемую контролируемым материалом.

На фиг. 2-4 показаны конструкции влагомера (устройства измерения) для контроля жидких и пастообразных материалов в трубопроводе, в потоке под давлением. В этом влагомере экранный проводник 2 выполнен в виде трубы, а сигнальный проводник 1 выполнен в виде металлического прутка, который расположен внутри трубы 2. Возможны четыре варианта выполнения прутка 1:

а) прутки расположены внутри трубы параллельно ее оси и имеют П-образную форму, концы прутка закреплены в электропроводах 15, расположенных на боковой поверхности трубы (этот вариант представлен на фиг. 2);

б) прутки расположены внутри трубы параллельно ее оси и имеют Г-образную форму, концы прутка закреплены в электропроводах 15, один из которых расположен на боковой поверхности трубы, а второй - на торцевой заглушке трубы (этот вариант представлен на фиг. 3);

в) прутки расположены внутри трубы параллельно ее оси и имеют форму прямого отрезка, концы прутка закреплены в электропроводах 15, расположенных на торцевых заглушках с противоположных концов трубы;

г) прутки расположены внутри трубы перпендикулярно ее оси вдоль диаметра трубы, имеют форму прямого отрезка, концы прутка закреплены в электропроводах 15, расположенных на боковой стенке трубы с противоположных ее сторон (этот вариант представлен на фиг. 4).

На фиг. 2-4 показаны варианты конструкции влагомера, у которого на внешней поверхности трубы 2 соосно с электропроводами 15 установлены два металлических корпуса 16, выполненные в виде стаканов с отверстием в дне, причем электропроводы 15 установлены в указанных отверстиях. На фиг. 2 показан вариант, в котором к корпусам 16 с помощью металлических трубок 17 прикреплен дополнительный корпус 18. В корпусе 18 размещен детектор 6, а отрезки 8, 9 кабелей подведены к детектору 6 через трубки 17. Влагомер такой конструкции может использоваться для контроля материалов с экстремальными температурами. Электронные компоненты детектора 6 термически

изолированы от контролируемого материала. Генератор 5 и устройство 7 измерения и управления размещаются в отдельном корпусе 27 на расстоянии от датчика и соединены с датчиком только кабелями.

На фиг. 5 показан влагомер в варианте исполнения, предназначенном для контроля сыпучих материалов в бункерах, лотках, в шнеках или на лентах конвейера. У этого варианта экранный проводник 2 выполнен в виде щита, а сигнальный проводник 1 выполнен в виде металлического прутка П-образной формы и закреплен на щите 2 посредством электровводов 15, содержащих диэлектрический изолятор. Входной отрезок 12 и дополнительные отрезки 8, 9 выполнены из коаксиального кабеля и подключены к сигнальному проводнику 1 датчика через указанные электровводы 15. На внешней поверхности щита 2 соосно с электровводами 15 установлены два металлических корпуса 16, выполненные в виде стаканов с отверстием в дне, причем, электровводы 15 установлены в указанных отверстиях. Внутри первого металлического корпуса 16, в котором находится выход 4 сигнального проводника 1, установлен детектор 6, стаканы соединены металлической трубкой 17. Внутри трубки 17 размещен отрезок 8 коаксиального кабеля, второй отрезок 9 коаксиального кабеля размещен в первом металлическом корпусе 16.

На торце прутка 1 вдоль его оси выполнено отверстие 18. Внутри отверстия 18 установлен датчик температуры 19 (например, термопара), подключенный к устройству 7 измерения и управления. Изолированные провода датчика 19 на выходе из отверстия 18 намотаны на ферритовое кольцо 20, образующее дроссель для токов высокой частоты. Такое решение исключает влияние датчика температуры 19 на измерения зондирующего сигнала.

На фиг. 6 показан вариант датчика погружного влагомера, который может быть использован для контроля сыпучих материалов в гуртах, амбарах, вагонах, в кузовах автомашин, а также при хранении и переработке сыпучих материалов непосредственно на местах отбора проб. Этот же вариант может быть применен для контроля жидких и пастообразных материалов в резервуарах. У этого варианта влагомера сигнальный 1 и экранный 2 проводники датчика выполнены в виде параллельных стержней, причем экранный проводник 2 может содержать либо один стержень, либо несколько параллельных стержней. В одном из стержней 2 выполнено вдоль его длины сквозное отверстие. Все стержни закреплены своими концами на первом и втором металлических основаниях 21 и 22, причем стержни, образующие экранный проводник 2, закреплены так, что образуют с основаниями 21 и 22 электрический контакт. Сигнальный проводник 1 закреплен своими концами на основаниях 21, 22 посредством электровводов 15, содержащих диэлектрический изолятор. Отрезки 8, 9 и 12 линии передачи выполнены из коаксиального кабеля и подключены к сигнальному проводнику 1 датчика через электровводы 15. Входной отрезок 12 и первый отрезок 8 кабеля подключены к входу 3 датчика со стороны первого основания 21, а второй отрезок 9 подключен к выходу 4 датчика со стороны второго металлического основания 22 и выведен на сторону первого основания 21 через упомянутое отверстие в стержне 2.

На фиг. 7 и 8 показан вариант датчика погружного влагомера, который предназначен для контроля жидких материалов в резервуарах и в трубопроводах. У этого варианта экранный проводник 2 датчика образован металлической трубой, причем в стенках трубы выполнены прорези 23, через которые происходит заполнение датчика контролируемым материалом. Сигнальный проводник 1 датчика выполнен в виде металлической трубки, которая расположена внутри трубы 2 параллельно ее оси. На концах трубка 1 закреплена в электровводах 15, содержащих диэлектрический изолятор.



Электровводы 15 расположены на торцевых стенках трубы 2. Подключение отрезков 8, 9 и 12 линии передачи к сигнальному проводнику датчика произведено через указанные электровводы, причем указанные отрезки выполнены из коаксиального кабеля, содержащего изолирующую оболочку. Отрезок 9 кабеля, подключенный к выходу 4 датчика, размещен внутри трубки 1. На выходе из трубки 1 со стороны входа 3 датчика отрезок 9 коаксиального кабеля намотан на ферритовое кольцо 20. Такое решение обеспечивает подавление паразитной электромагнитной связи между входом 3 датчика и экранированным проводником коаксиального кабеля 9. Для установки на трубопроводе датчик снабжен фланцем 24. Предлагаемый датчик может применяться также для контроля жидких материалов в резервуарах, в этом случае вместо фланца 24 на датчике выполняют штуцер с резьбовым соединением для крепления датчика к трубе, причем выходящие из датчика кабели пропускают через указанную трубу.

На фиг. 9 и 10 показаны два возможных варианта спектров сигналов, по которым определяют частоты гармоник: графики зависимости от частоты напряжения  $U_{det}$  на выходе детектора 6 и напряжения  $U_a$  на выходе усилителя 25 с нелинейной характеристикой. На этих же фигурах приведены эквивалентные схемы детектора 6, выполненного в виде фазового дискриминатора, причем на фиг. 9 показаны спектр и схема детектора, у которого минимум выходного сигнала достигается при синфазных входных сигналах. На фиг. 10 показаны спектр и схема детектора, у которого минимум выходного сигнала достигается при противофазных входных сигналах. Для формирования такой характеристики на входах детектора 6 включены трансформаторы 26, которые обеспечивают сдвиг фаз на  $180^\circ$  одного входного сигнала детектора относительно его второго сигнала, для этого вторичная обмотка одного трансформатора 26 включена синфазно с его первичной обмоткой, а у другого трансформатора 26 вторичная обмотка включена противофазно с первичной обмоткой.

Изготовленные по данному техническому решению образцы влагомеров выполнены как сборка из двух модулей: датчика и электронного блока 27. В состав электронного блока входят генератор 5 и устройство 7 измерения и управления. Такое решение имеет то достоинство, что электронные блоки для всех вариантов влагомера - идентичные, взаимозаменяемые. Влагомеры отличаются только датчиками, конструкция которых зависит от измеряемого материала и условий измерения (в трубопроводе, в резервуаре, в бункере, в лотке и т.п.).

Устройство измерения физических параметров материала работает следующим образом. Генератор 5 перестраивают в диапазоне рабочих частот посредством устройства 7 измерения и управления. Сформированный генератором 5 гармонический зондирующий сигнал подают на вход 3 датчика либо непосредственно, либо через отрезок 12 линии передачи. Фазу зондирующего сигнала, прошедшего на выход 4 датчика, сравнивают с фазой сигнала на входе 3 датчика. Указанное сравнение фаз производят в детекторе 6. Напряжения зондирующего сигнала с входа 3 и с выхода 4 датчика подают на входы детектора 6 через дополнительные отрезки 8, 9 линии передачи. При перестройке генератора 5 измеряют напряжение на выходе детектора 6 и находят частоту или несколько частот, на которых напряжение на выходе детектора 6 достигает минимума. Эти частоты являются частотами гармоник.

Частоты гармоник характеризуются тем, что на этих частотах длина сигнального проводника 1 датчика равна или кратна половине длины волны зондирующего сигнала в материале, заполняющем датчик. Такое определение частоты гармоники тождественно следующему определению: на частоте гармоники фазовый сдвиг зондирующего сигнала по длине датчика равен или кратен  $180^\circ$ . Для точного измерения фазового набега

зондирующего сигнала, приходящегося на датчик, отрезки 8, 9 линии имеют равные электрические длины и в них создан режим бегущих волн.

Необходимо отметить главную особенность предложенного технического решения, принципиально отличающую его от известных фазовых методов измерения влажности.

5 В известных решениях фактически измеряют суммарный фазовый сдвиг зондирующего сигнала, прошедшего через датчик с контролируемым материалом и через подсоединенные к датчику отрезки линии передачи. Но суммарный фазовый сдвиг сигнала зависит от соотношения волновых сопротивлений линии передачи датчика и подключенных к датчику отрезков линии передачи. Для разных контролируемых  
10 материалов, а также при изменении влажности контролируемого материала волновое сопротивление линии передачи датчика меняется. В результате по измеренной фазе нельзя точно определить величину фазового набега, приходящегося непосредственно на отрезок линии передачи датчика. Такая неопределенность в измерениях не позволяет точно измерить диэлектрические параметры материала.

15 В предложенном техническом решении указанная неопределенность в измерениях устранена благодаря использованию следующего свойства двух включенных каскадно отрезков длинных линий передачи: если длина первого (входного) отрезка равна или кратна половине длины волны, то на суммарный фазовый сдвиг сигнала на выходе второго отрезка не влияет волновое сопротивление первого отрезка.

20 Это свойство длинных линий и является основой предложенного технического решения. Данную особенность предложенного решения можно сформулировать и так: измерения диэлектрических параметров производят в момент, когда на эти измерения не влияет соотношение волновых сопротивлений линии передачи датчика и подключенных к датчику отрезков линии передачи.

25 По длине сигнального проводника 1 датчика и частоте зондирующего сигнала, на которой укладывается на этой длине известное целое число полувольт, можно определить фазовую скорость зондирующего сигнала в материале датчика и по ней определить диэлектрическую проницаемость и остальные физические параметры. В предложенном  
30 решении, как и в первом аналоге, а также как и в прототипе, диэлектрические параметры находят путем измерения частот гармоник при заполнении датчика контролируемым материалом и при заполнении его воздухом.

По отношению указанных частот гармоник определяют показатель преломления 72 материала, точнее, его действительную составляющую, с помощью следующего выражения:

$$35 \quad n = \frac{f_i^0}{f_i^M}, \quad (2)$$

40 где  $f_i^M$  - частота гармоники с номером  $i$  при заполнении датчика контролируемым материалом;

$f_i^0$  - частота гармоники с номером  $i$  при заполнении датчика воздухом;  
 $i$  - номер гармоники.

45 Номер гармоники  $i$  равен количеству полувольт, «укладывающихся» на длине  $L$  сигнального проводника 1 датчика:

$$L = \left( \frac{\lambda_M}{2} \right) \cdot i, \quad (3)$$

5 где  $\lambda_M$  - длина волны в среде материала, заполняющего датчик, причем номер гармоники  $i=1, 2, 3, \dots$

Измерения частот гармоник выполняют поочередно при заполнении датчика воздухом и при заполнении его контролируемым материалом. В зависимости от ширины диапазона перестройки в результате измерений можно получить значения частот ряда  
10 гармоник. Измерение частоты гармоники при воздушном заполнении датчика достаточно выполнить один раз при изготовлении прибора и эти данные занести в память процессора устройства измерения 7. При эксплуатации влагомера повторное измерение при воздушном заполнении может потребоваться только для метрологической проверки.

15 Для обеспечения высокой точности предпочтительнее работа с низшими гармониками. В большинстве практических случаев достаточно проводить измерения только на первой или второй гармониках ( $i=1$  или  $2$ ). Для измерений на второй гармонике необходим детектор 6, у которого минимум выходного напряжения  $U_{det}$  достигается при синфазных сигналах на входах, то есть когда его входные сигналы имеют фазовый  
20 сдвиг  $\phi=360^\circ, 720^\circ, \dots$ . Этот вариант показан на фиг. 9. На фиг. 10 представлен спектр и вариант детектора при измерении на первой гармонике. У показанного на фиг. 10 детектора 6 минимум выходного сигнала достигается, когда его входные сигналы противофазны, то есть сдвиг фаз между ними равен  $\phi=180^\circ, 540^\circ, \dots$ . Фазовый дискриминатор, схема которого показана на фиг. 9 и 10, содержит полупроводниковый  
25 диод, который подключен к цепям зондирующего сигнала через разделительные конденсаторы. Выходное напряжение дискриминатора снимается непосредственно с полупроводникового диода и передается на выход детектора 6 через резисторы, сопротивление которых на порядок больше, чем сопротивления резисторов 10, 11. Отметим, что представленные на фиг. 9, 10 схемы фазового дискриминатора  
30 -упрощенные, но выполненный буквально по этим схемам детектор работоспособен.

В отличие от требований, предъявляемых к фазовому детектору известных технических решений (второй аналог), к фазовому дискриминатору по данному  
35 техническому предложению предъявляются иные требования, в частности, линейность преобразования разности фаз входных сигналов в дискриминаторе не имеет значения. Соответственно, и принцип контроля совпадения фаз (или противофазности) входных сигналов иной, чем при непрерывном измерении фазы. Точность фиксации совпадения фаз (противофазности) сигналов намного выше, чем точность измерения произвольного значения фазы в диапазоне  $0-360^\circ$ . Поэтому точность измерения физических параметров по предлагаемому решению значительно выше и обеспечивается, в том числе, и для  
40 материалов, значительно ослабляющих зондирующий сигнал.

В предлагаемом решении одновременно решена проблема неоднозначности измерения фазы, присущая второму аналогу: измеряемая на фиксированной частоте фаза сигнала, прошедшего через материал с высокой диэлектрической проницаемостью, может  
45 многократно превышать  $360^\circ$ . В предлагаемом техническом решении эта проблема решается выбором нижней частоты диапазона перестройки генератора: указанная частота должна быть ниже, чем частота первой (или второй) гармоник. Если из-за высокой диэлектрической проницаемости материала это требование выполнить не удастся, то применяют решение, описанное в патентах первого аналога и прототипа:

показатель преломления  $n$  определяют через разность частот соседних гармоник.

Приведенный в формуле (2) показатель преломления  $n$  в технической литературе также называют коэффициентом замедления или коэффициентом укорочения длины волны. Этот параметр связан с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$  материала при низких диэлектрических потерях следующим соотношением:

$$\epsilon_r = n^2 \quad (4)$$

По измеренному значению  $n$  (или  $\epsilon_r$ ) определяют влажность материала или другие физические параметры, влияющие на диэлектрическую проницаемость, например, концентрацию смеси веществ, плотность. Для вычислений используются записанные в процессор устройства 7 калибровочные таблицы, связывающие измеряемый параметр со значениями  $n$  (или  $\epsilon_r$ ). Для определения влажности одновременно измеряют температуру контролируемого материала. В изготовленных по данному техническому решению влагомерах калибровочные таблицы записаны для четырех значений температур из возможного рабочего диапазона. Построение калибровочной таблицы для конкретной температуры влагомер производит автоматически путем интерполяции между таблицами с ближайшими значениями температур, записанных в память процессора устройства 7.

При высокой электропроводности контролируемого материала его диэлектрические параметры становятся комплексными. Комплексную диэлектрическую проницаемость  $\dot{\epsilon}_r$  определяют через комплексный показатель преломления  $\dot{n}$  на основе следующих соотношений:

$$\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = (n - jk)^2 = (n^2 - k^2) - j(2nk) \quad (5)$$

Действительную часть  $n$  комплексного показателя преломления  $\dot{n} = n - jk$  определяют по формуле (2), мнимую составляющую  $k$  определяют по ослаблению зондирующего сигнала в контролируемом материале. Для измерения  $k$  в состав детектора 6 включено устройство для измерения и вычисления отношения напряжений  $U_3, U_4$  зондирующего сигнала, соответственно, на входе 3 и выходе 4 датчика. По отношению  $U_3/U_4$ , характеризующему ослабление зондирующего сигнала в материале, определяют мнимую составляющую  $k$  по формуле:

$$k = \frac{\lambda_0}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{U_3}{U_4}\right), \quad (6)$$

где  $\lambda_0$  - длина волны в воздухе;

$L$  - длина сигнального проводника 1 датчика.

При расчете отношения  $U_3/U_4$  учитывают коэффициент деления напряжения, приведенный в выражении (1).

Таким образом, предложенное техническое решение позволяет определить комплексные значения диэлектрических параметров, что повышает точность измерения материалов, обладающих электрической проводимостью.

Поиск минимумов в спектре выходного сигнала детектора 6 и вычисление по ним частот гармоник может выполняться по одному из приведенных ниже алгоритмов.

Алгоритм 1.

Генератор 5 перестраивают в диапазоне частот дискретными шагами и на каждом шаге перестройки фиксируют напряжение, измеренное с помощью детектора 6. По набору измеренных значений напряжения, полученному для всего диапазона частот перестройки, определяют частоты гармоник. По найденным значениям частот гармоник процессор устройства 7 вычисляет показатель преломления  $n$  материала. Далее, по калибровочным характеристикам контролируемого материала с учетом его температуры процессор вычисляет физические параметры этого материала. Для обеспечения работы по данному алгоритму генератор 5 выполнен в виде синтезатора, который формирует частоту зондирующего сигнала по цифровому коду, задаваемому устройством 7 измерения и управления.

#### Алгоритм 2.

Генератор 5 перестраивают в диапазоне частот непрерывно до обнаружения минимума напряжения  $U_{det}$ . Далее генератор 5 переводят в режим автосопровождения - автоматической подстройки под частоту минимума. При нахождении минимума производят отсчет частоты генератора 5 и далее, как и в предыдущем алгоритме, вычисляют показатель преломления, по которому определяют физические параметры контролируемого материала. Для реализации данного алгоритма в устройство 7 введены аналоговый узел, выполненный с возможностью перестройки частоты генератора 5 до достижения минимума на выходе детектора 6, и узел измерения частоты генератора 5. Для повышения точности измерения частот гармоник в состав устройства 7 введен усилитель 25 с нелинейной амплитудной характеристикой, обеспечивающий усиление выходного напряжения детектора 6 таким образом, что напряжение низкого уровня усиливается, а напряжение высокого уровня ограничивается. В спектрах, показанных на фиг. 9 и 10, минимумы напряжения  $U_a$  обостряются, что позволяет повысить точность измерения частоты минимума.

В предлагаемом техническом решении, как и в прототипе, детектор 6 подключен к датчику через отрезки линий передачи, это позволяет разместить полупроводниковые радиоэлементы устройства измерения на удалении от конструктивных элементов датчика, непосредственно соприкасающихся с контролируемым материалом. Для измерения материалов при экстремальных температурах проводники входного 12 и дополнительных отрезков 8, 9 линии передачи и проводники 1, 2 датчика выполнены из металла, устойчивого к воздействию высоких температур, а электрическое соединение указанных проводников выполнено с помощью высокотемпературного припоя.

Одно из преимуществ предложенного технического решения состоит в том, что в отличие от известных решений, в предложенном измерение проводящих материалов обеспечено без установки диэлектрических трубок поверх сигнального проводника. Это позволяет применять влагомеры на абразивных материалах, а также на сыпучих материалах с крупными фракциями. Для указанных применений сигнальный проводник датчика выполняют из коррозионно-стойкой закаленной стали, например, марки 40X13 (AISI 420).

Проведенные испытания изготовленных образцов устройства измерения физических параметров (влагомера) подтвердили эффективность предлагаемого технического решения. В качестве примера приведем результаты испытаний изготовленного образца влагомера на водных растворах соли NaCl, причем, как ненасыщенных, так и насыщенных и содержащих нерастворенную твердую фазу. Основные параметры влагомера:

- длина сигнального проводника датчика равна 100 мм;
- детектор выполнен в варианте, для которого минимум выходного сигнала

соответствует противофазным входным сигналам (фиг. 10);

- диапазон перестройки генератора 2...390 МГц;

- допустимый уровень ослабления зондирующего сигнала в датчике - не менее 60 дБ;

5 - диапазон измерений показателя преломления  $n=4...120$ .

Влагомер обеспечивает измерения диэлектрических параметров и содержания воды во всем диапазоне от чистой воды до суспензии, в которой отношение твердой фазы к жидкой составляет 100%.

10 (57) Формула изобретения

1. Способ измерения физических параметров материала, в котором применяют датчик, выполненный в виде отрезка длинной линии передачи с сигнальным проводником и одним или несколькими экранными проводниками, датчик заполняют контролируемым материалом и на его вход подают зондирующий высокочастотный гармонический сигнал, который формируют генератором, генератор перестраивают в 15 диапазоне частот и при перестройке измеряют напряжение на выходе детектора, преобразующего высокочастотный зондирующий сигнал в напряжение низкой частоты, и по минимальным значениям указанного напряжения определяют частоты гармоник, характеризующиеся тем, что на этих частотах длина сигнального проводника датчика равна или кратна половине длины волны зондирующего сигнала в материале, 20 заполняющем датчик, причем на вход детектора зондирующий сигнал подают с входа датчика через первый дополнительный отрезок линии передачи, в котором создают режим бегущих волн, частоту гармоник, измеренную при заполнении датчика контролируемым материалом, сравнивают с частотой гармоник, измеренной при 25 заполнении датчика воздухом, и по этим частотам или по их отношению определяют физические параметры материала, отличающийся тем, что частоты гармоник определяют посредством сравнения фазы зондирующего сигнала на входе датчика с фазой зондирующего сигнала на выходе датчика, сравнение фаз производят в детекторе, выполненном в виде фазового дискриминатора, у которого выходное напряжение 30 достигает минимума, когда его входные сигналы или синфазны, или противофазны, зондирующий сигнал с выхода датчика подают на второй вход детектора через введенный в состав влагомера второй дополнительный отрезок линии передачи, электрическая длина которого выбрана равной электрической длине первого дополнительного отрезка, причем во втором дополнительном отрезке создают режим 35 бегущих волн.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что упомянутые физические параметры материала представляют собой влажность материала, диэлектрическую проницаемость, концентрацию смеси веществ, плотность, показатель преломления материала.

3. Способ по п. 2, отличающийся тем, что генератор перестраивают в диапазоне 40 частот дискретными шагами, на каждом шаге перестройки определяют напряжение на выходе детектора и по частотной зависимости указанного напряжения, измеренной во всем диапазоне частот перестройки генератора, определяют частоты гармоник.

4. Способ по п. 2 или 3, отличающийся тем, что сравнивают уровни зондирующего сигнала на входе и выходе датчика, по их отношению определяют диэлектрические 45 потери в контролируемом материале и по полученному значению потерь уточняют измеряемые физические параметры.

5. Устройство измерения физических параметров материала, содержащее датчик, выполненный в виде отрезка длинной линии передачи с сигнальным проводником и

одним или несколькими экранными проводниками, пространство между которыми предназначено для заполнения контролируемым материалом, подключенный к входу датчика генератор, формирующий высокочастотный гармонический зондирующий сигнал, причем генератор выполнен перестраиваемым в диапазоне частот и имеет вход управления для регулировки частоты, детектор, преобразующий высокочастотный зондирующий сигнал в напряжение низкой частоты, устройство измерения и управления, к которому подключен вход управления генератора и выход детектора, первый дополнительный отрезок двухпроводной линии передачи, вход указанного отрезка подключен к входу датчика, а его выход подключен к первому входу детектора, причем первый дополнительный отрезок линии передачи выполнен согласованным на выходе, подключенном к детектору, что обеспечено, например, подсоединением согласующего резистора параллельно выходу указанного отрезка, выход генератора подключен к входу датчика или непосредственно, или через входной отрезок линии передачи, отличающееся тем, что упомянутый детектор выполнен в виде фазового дискриминатора, у которого выходное напряжение достигает минимума, когда его входные высокочастотные сигналы синфазны или противофазны, введен второй дополнительный отрезок двухпроводной линии передачи, вход которого подключен к выходу датчика, а выход второго дополнительного отрезка подключен ко второму входу детектора, причем электрическая длина второго дополнительного отрезка равна электрической длине первого дополнительного отрезка и второй дополнительный отрезок линии передачи также выполнен согласованным на выходе, подключенном к детектору.

6. Устройство по п. 5, отличающееся тем, что генератор зондирующего сигнала выполнен в виде синтезатора, который формирует частоту зондирующего сигнала по цифровому коду, задаваемому устройством измерения и управления, а устройство измерения и управления содержит процессор, который вычисляет физические параметры материала по значениям частот гармоник зондирующего сигнала.

7. Устройство по п. 6, отличающееся тем, что в состав устройства измерения и управления введен усилитель с нелинейной амплитудной характеристикой, обеспечивающий усиление выходного напряжения детектора таким образом, что напряжение низкого уровня усиливается, а напряжение высокого уровня ограничивается.

8. Устройство по п. 7, отличающееся тем, что в состав детектора включено устройство для измерения и вычисления отношения уровней зондирующего сигнала на входе и выходе датчика, выход указанного устройства подключен к устройству измерения и управления, причем процессор устройства измерения и управления вычисляет физические параметры материала по значениям частот гармоник и по величине отношения уровней зондирующего сигнала на входе и выходе датчика.

9. Устройство по любому из пп. 5-8, отличающееся тем, что подключение первого дополнительного отрезка линии передачи к входу датчика произведено через делитель мощности, выполненный, например, в виде резистора, который включен между входом датчика и входом первого дополнительного отрезка линии передачи.

10. Устройство по любому из пп. 5-8, отличающееся тем, что экранный проводник датчика выполнен в виде трубы, а сигнальный проводник датчика выполнен в виде металлического прутка, который расположен внутри трубы, или параллельно ее оси, или перпендикулярно к оси трубы вдоль диаметра, на концах сигнальный проводник закреплен в электропроводах, содержащих диэлектрический изолятор, электропроводы расположены либо на боковой поверхности трубы, либо на торцевой заглушке трубы, соответственно, сигнальный проводник датчика имеет либо П-образную форму, либо

Г-образную форму, либо форму прямого отрезка, входной и дополнительные отрезки линии передачи выполнены из коаксиального кабеля и подключены к сигнальному проводнику датчика через указанные электровводы.

5 11. Устройство по п. 10, отличающееся тем, что на внешней поверхности трубы соосно с электровводами установлены два металлических корпуса, выполненные в виде стаканов с отверстием в дне, причем электровводы установлены в указанных отверстиях, стаканы соединены металлическими трубками с дополнительным корпусом, внутри которого установлен детектор, дополнительные отрезки линии передачи  
10 размещены в указанных трубках.

12. Устройство по любому из пп. 5-8, отличающееся тем, что экранирующий проводник датчика выполнен в виде щита, а сигнальный проводник датчика выполнен в виде  
15 металлического прутка, который установлен на щите и имеет П-образную форму, на концах сигнальный проводник закреплен в электровводах, содержащих диэлектрический изолятор, указанные электровводы закреплены в щите, входной и дополнительные  
15 отрезки линии передачи выполнены из коаксиального кабеля и подключены к сигнальному проводнику датчика через указанные электровводы.

13. Устройство по п. 12, отличающееся тем, что на внешней поверхности щита соосно с электровводами установлены два металлических корпуса, выполненные в виде  
20 стаканов с отверстием в дне, причем электровводы установлены в указанных отверстиях, внутри первого металлического корпуса, в котором находится выход сигнального проводника датчика, установлен детектор, стаканы соединены металлической трубкой, внутри которой размещен первый дополнительный отрезок линии передачи, второй  
20 дополнительный отрезок линии передачи размещен в первом металлическом корпусе.

14. Устройство по любому из пп. 5-8, отличающееся тем, что проводники входного  
25 и дополнительных отрезков линии передачи и проводники датчика выполнены из металла, устойчивого к воздействию высоких температур, а электрическое соединение указанных проводников выполнено с помощью высокотемпературного припоя.

15. Устройство по любому из пп. 5-8, отличающееся тем, что в сигнальном проводнике, выполненном в виде металлического прутка, на его торце выполнено  
30 отверстие вдоль оси прутка, внутри отверстия установлен датчик температуры, например термopара, провода датчика температуры подключены к устройству измерения и управления, причем на выходе из отверстия в прутке указанные провода намотаны на ферритовое кольцо.

16. Устройство по любому из пп. 5-8, отличающееся тем, что экранирующий и сигнальный  
35 проводники датчика выполнены в виде параллельных стержней, причем экранирующий проводник может содержать либо один стержень, либо несколько параллельных стержней, в одном из которых выполнено вдоль его длины сквозное отверстие, все стержни закреплены своими концами на первом и втором металлических основаниях, причем стержни, образующие экранирующий проводник, закреплены на основаниях так,  
40 что образуют с основаниями электрический контакт, сигнальный проводник закреплен своими концами на основаниях посредством электровводов, содержащих диэлектрический изолятор, входной и дополнительные отрезки линии передачи  
45 выполнены из коаксиального кабеля и подключены к сигнальному проводнику датчика через указанные электровводы, при этом входной и первый дополнительный отрезки линии передачи подключены к входу датчика со стороны первого основания, второй дополнительный отрезок линии передачи подключен к выходу датчика со стороны второго металлического основания и выведен на сторону первого основания через упомянутое отверстие в стержне.



17. Устройство по любому из пп. 5-8, отличающееся тем, что экранирующий проводник датчика выполнен в виде трубы с прорезями в ее стенках, а сигнальный проводник датчика выполнен в виде металлической трубки, которая расположена внутри упомянутой трубы параллельно ее оси, на концах сигнальный проводник закреплен в электровводах, содержащих диэлектрический изолятор, электровводы расположены на торцевых стенках трубы, подключение входного и дополнительных отрезков линии передачи к сигнальному проводнику датчика произведено через указанные электровводы, входной и дополнительные отрезки линии передачи выполнены из коаксиального кабеля, второй дополнительный отрезок линии передачи, подключенный к выходу датчика, размещен внутри трубки, образующей сигнальный проводник, на выходе из трубки со стороны входа датчика указанный отрезок коаксиального кабеля намотан на ферритовое кольцо.

15

20

25

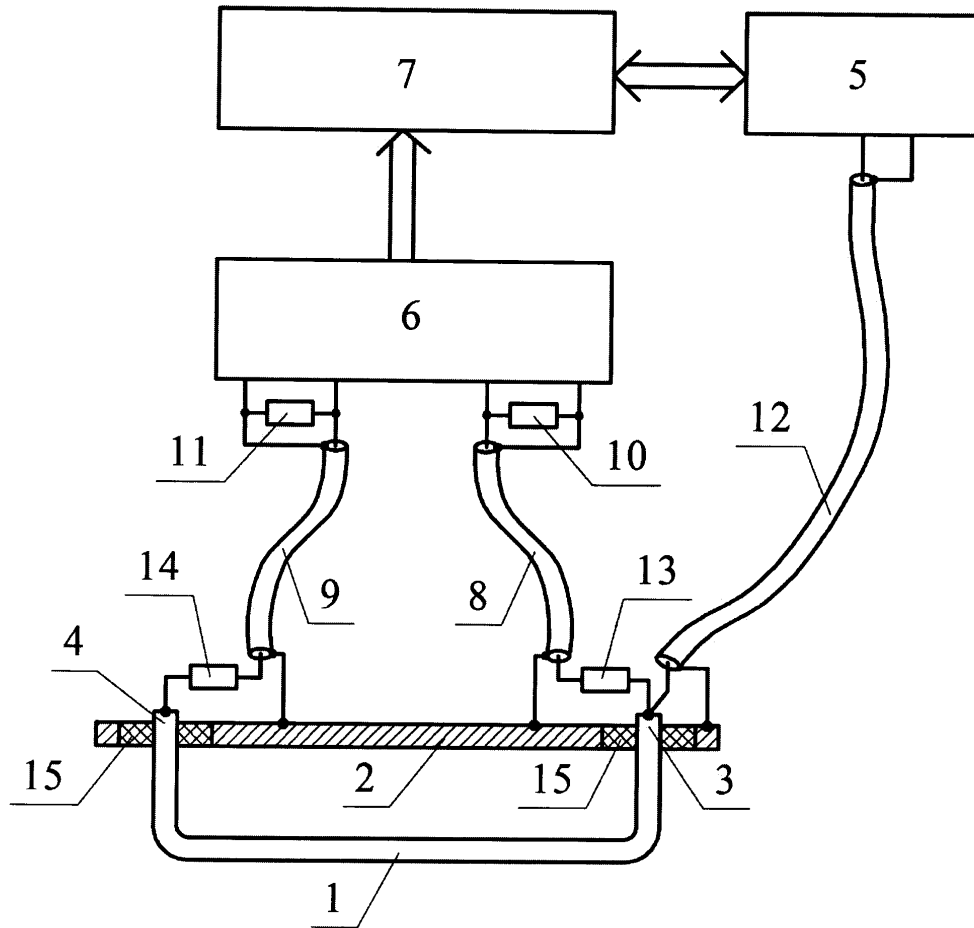
30

35

40

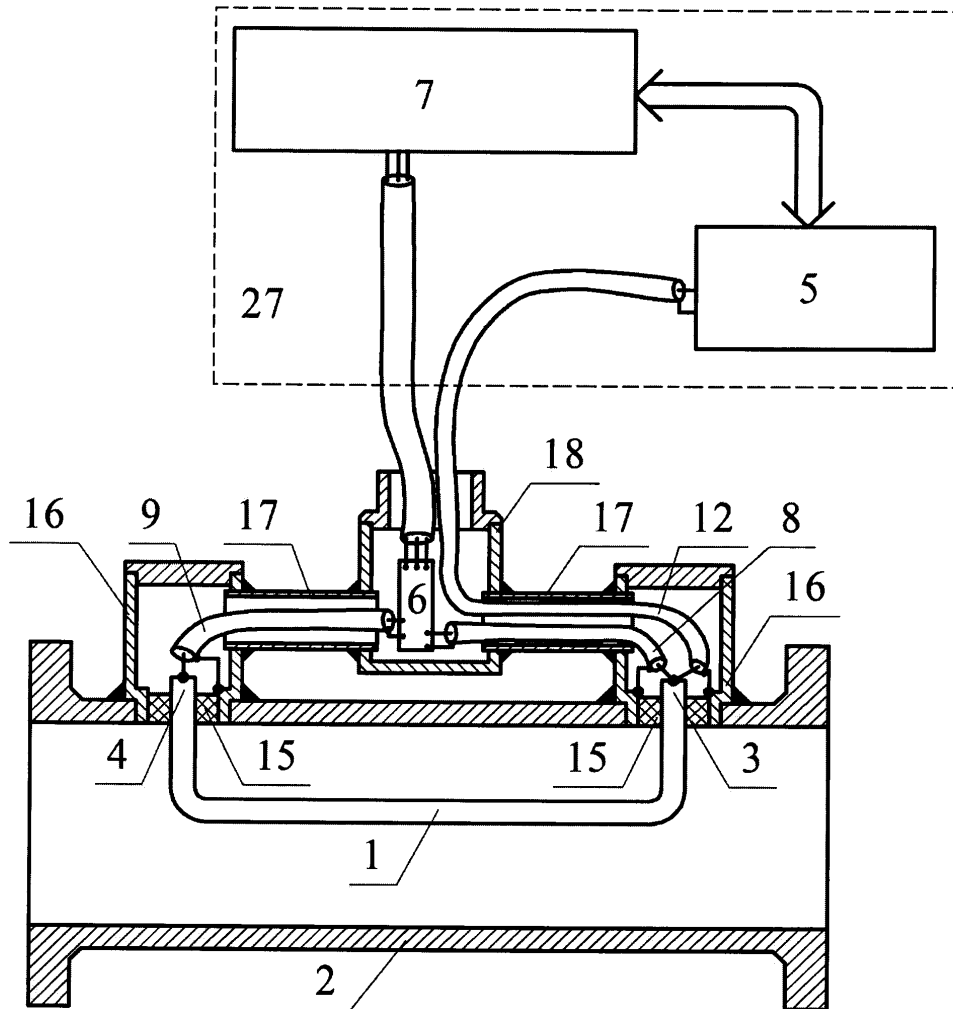
45

1

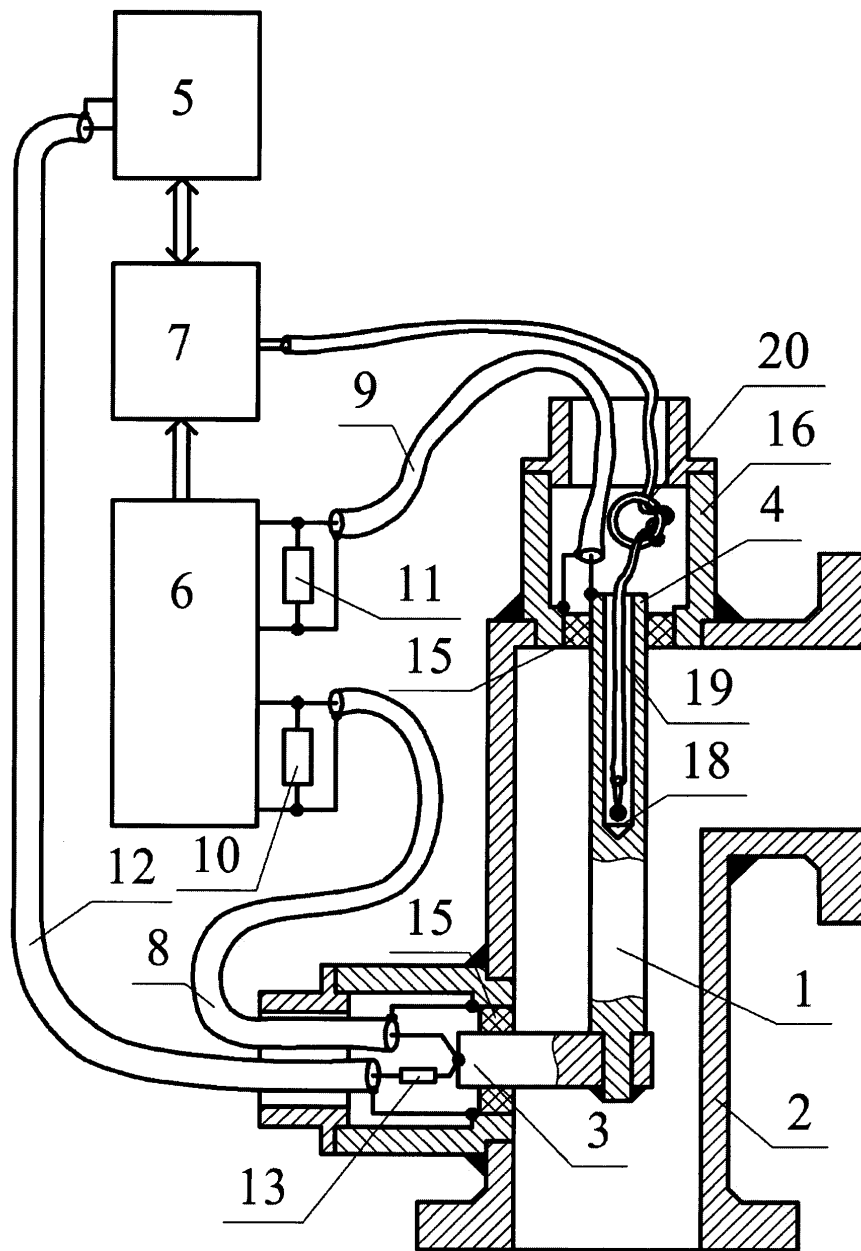


Фиг. 1

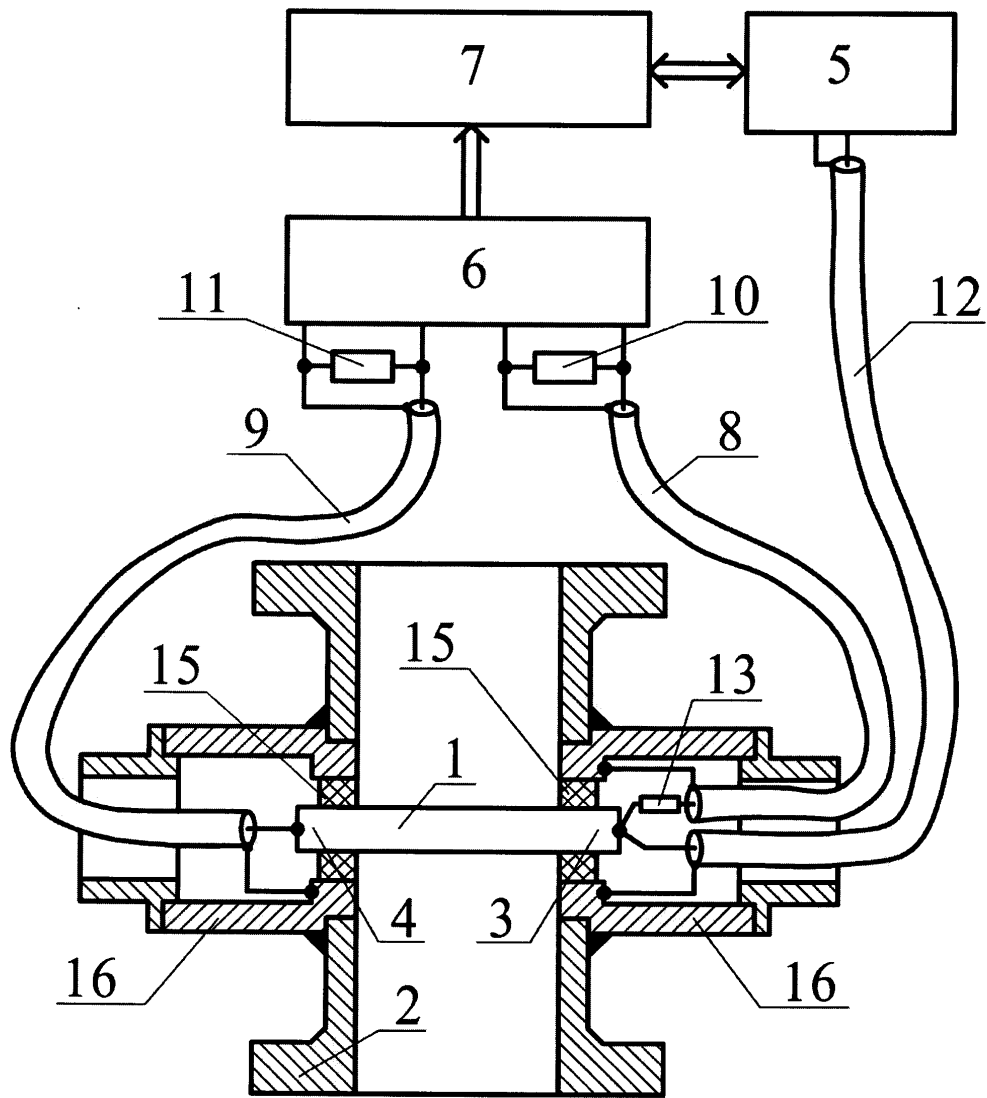
2



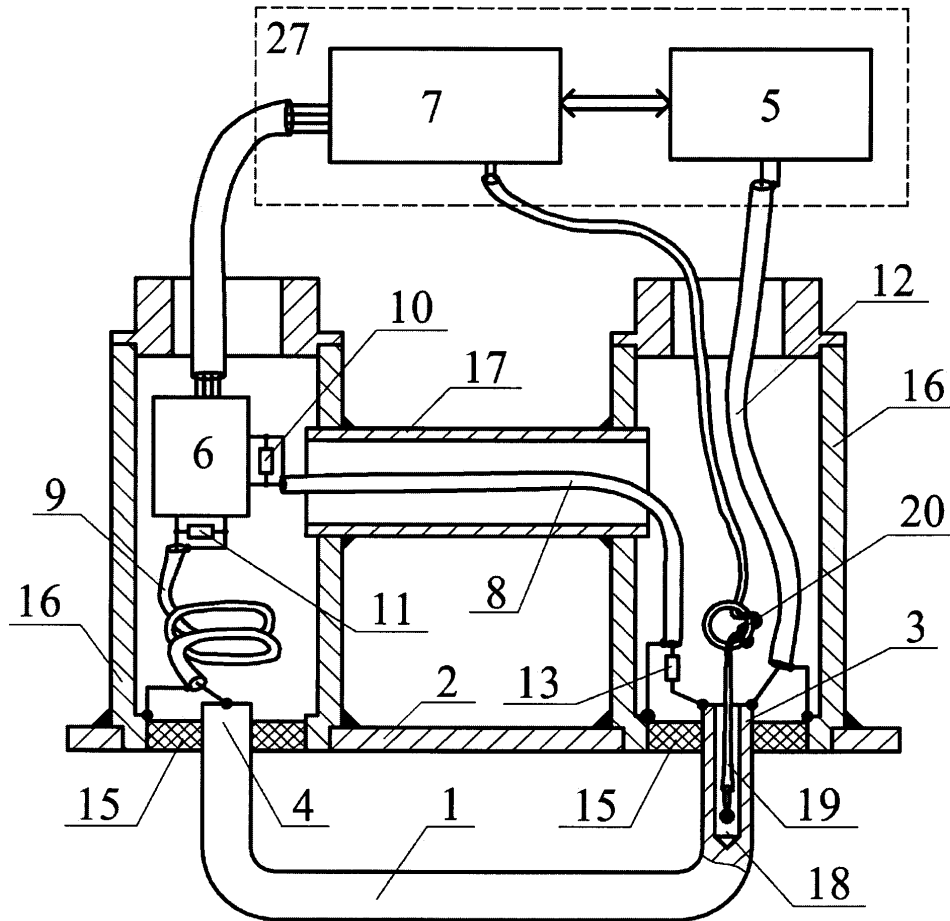
Фиг. 2



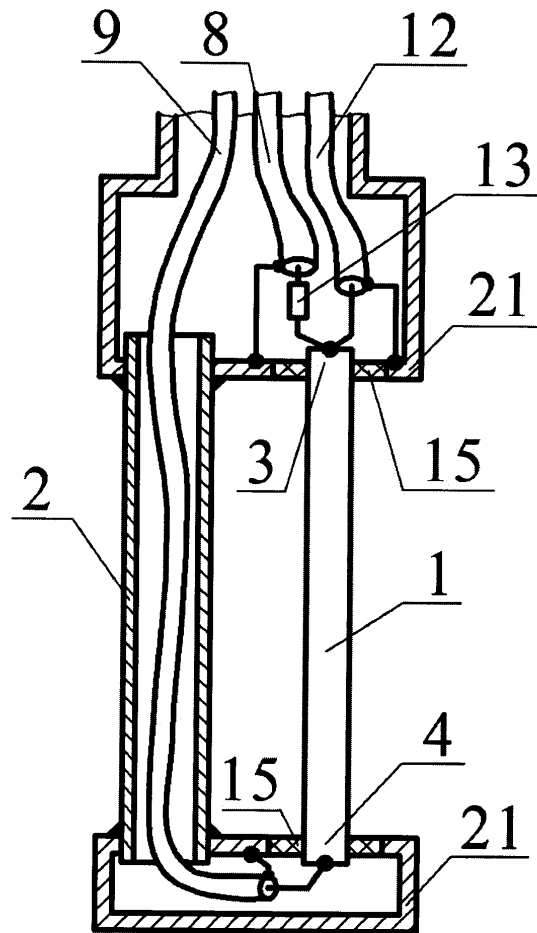
Фиг. 3



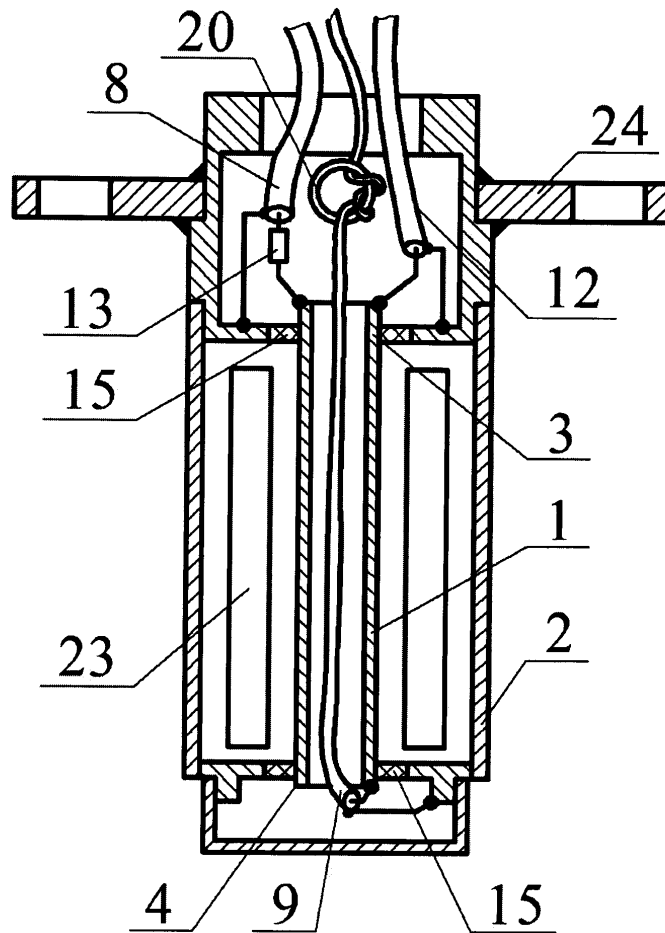
Фиг. 4



Фиг. 5

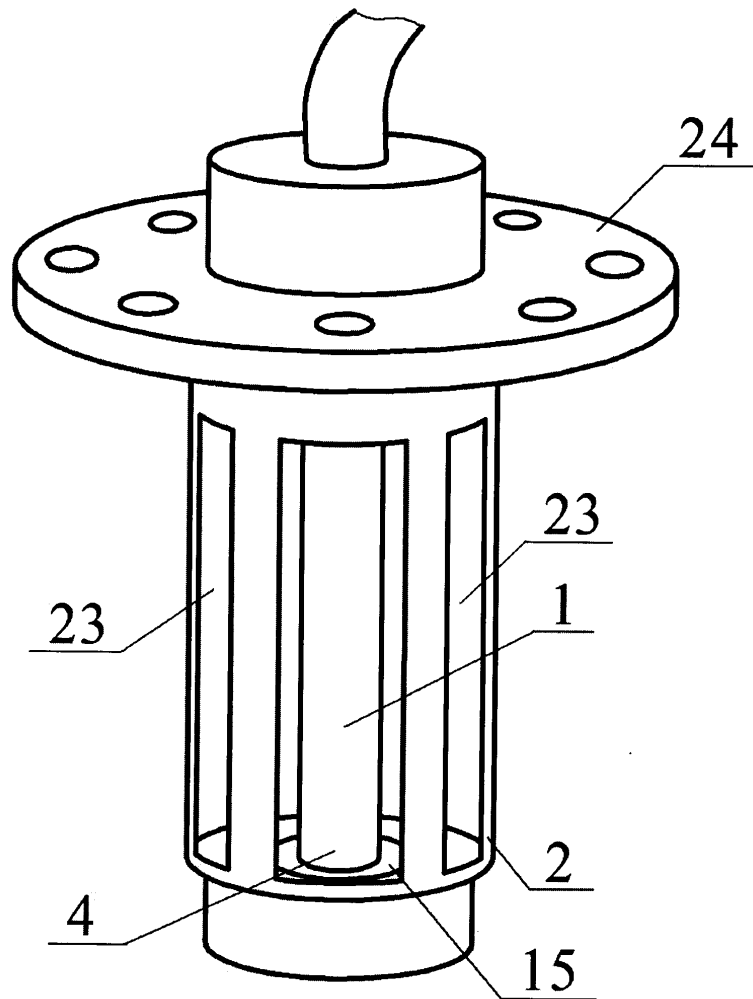


Фиг. 6

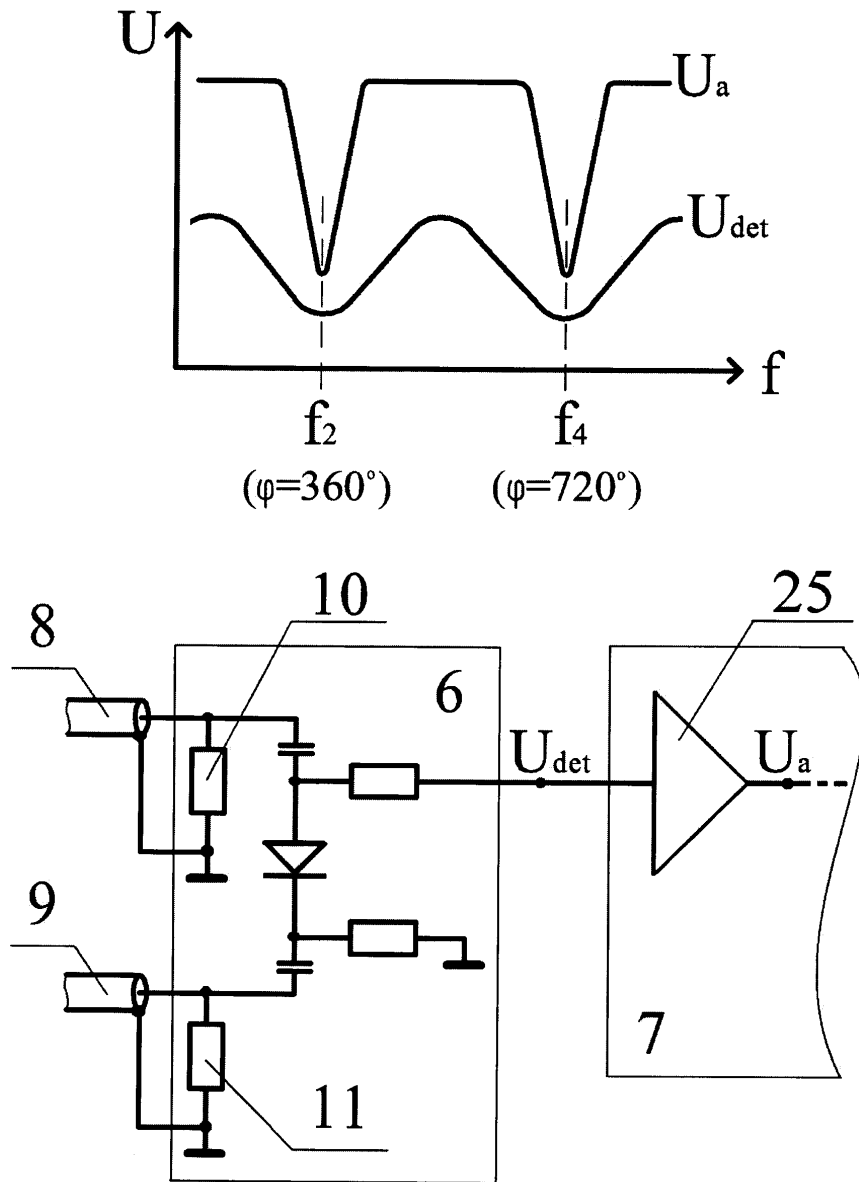


Фиг. 7

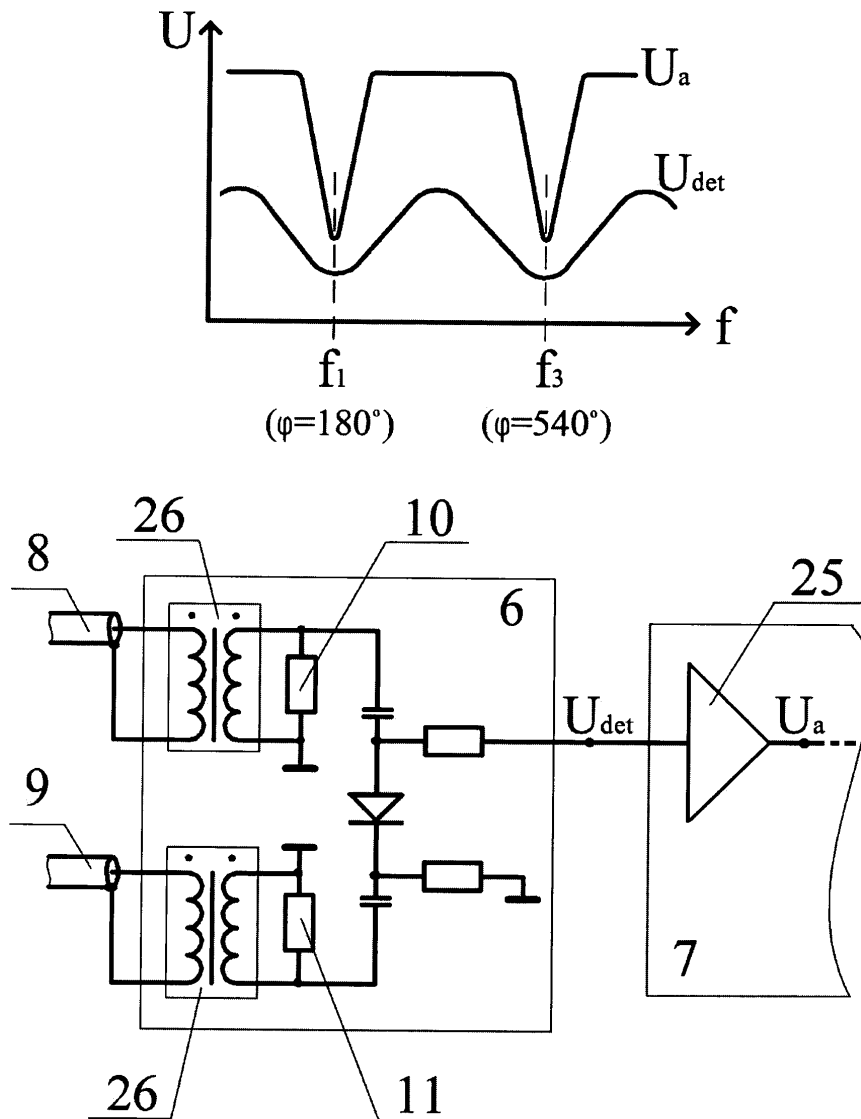




Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10