

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2571301

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА

Патентообладатель(ли): *Сизиков Олег Креонидович (RU)*

Автор(ы): *Сизиков Олег Креонидович (RU)*

Заявка № 2013143105

Приоритет изобретения **23 сентября 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **23 ноября 2015 г.**

Срок действия патента истекает **23 сентября 2033 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013143105/28, 23.09.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.09.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.09.2013

(43) Дата публикации заявки: 27.03.2015 Бюл. № 9

(45) Опубликовано: 20.12.2015 Бюл. № 35

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: US 7944220 B2, 17.05.2011. US 6281801 B1, 28.08.2001. US 5859536 A, 12.01.1999. US 5459403 A, 17.10.1995.

(72) Автор(ы):

Сизиков Олег Креонидович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Сизиков Олег Креонидович (RU)

(54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА

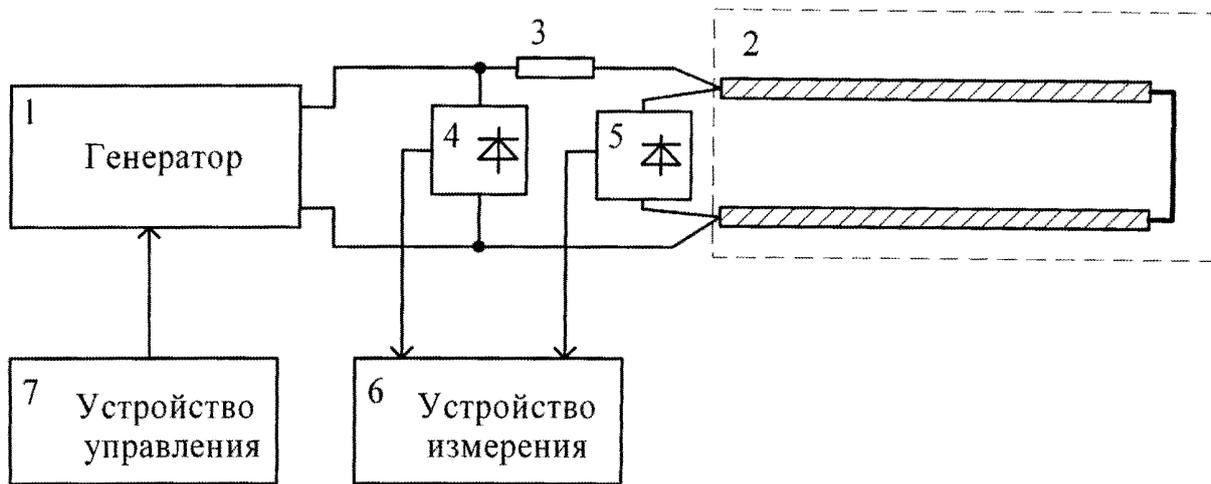
(57) Реферат:

Техническое решение относится к измерительной технике и предназначено для измерения диэлектрической проницаемости и влажности материала. Способ включает в себя измерение напряжения зондирующего сигнала во входной цепи первичного преобразователя, заполняемого контролируемым материалом, причем первичный преобразователь выполнен в виде короткозамкнутого на конце отрезка длинной линии. Измерения напряжения выполняют одновременно в двух точках: непосредственно на входе преобразователя и на резисторе, включенном между генератором и преобразователем. Генератор перестраивают в диапазоне частот дискретными шагами. На каждом шаге вычисляют отношение напряжения на входе первичного преобразователя к

напряжению на входе элемента и по минимуму этого отношения определяют частоты гармоник при заполнении первичного преобразователя воздухом и при заполнении его контролируемым материалом. По значениям частот нескольких гармоник вычисляют действительную составляющую показателя преломления материала. Мнимую составляющую показателя преломления вычисляют по величине отношения напряжения на входе первичного преобразователя к напряжению на входе резистора. Далее определяют влажность и другие физические параметры, влияющие на показатель преломления. Технический результат заключается в повышении точности измерений и расширении функциональных возможностей. 6 з.п. ф-лы, 5 ил.

RU 2 571 301 C2

RU 2 571 301 C2



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2013143105/28, 23.09.2013

(24) Effective date for property rights:
23.09.2013

Priority:

(22) Date of filing: 23.09.2013

(43) Application published: 27.03.2015 Bull. № 9

(45) Date of publication: 20.12.2015 Bull. № 35

(72) Inventor(s):

Sizikov Oleg Kreonidovich (RU)

(73) Proprietor(s):

Sizikov Oleg Kreonidovich (RU)

(54) **METHOD TO MEASURE PHYSICAL PARAMETERS OF MATERIAL**

(57) Abstract:

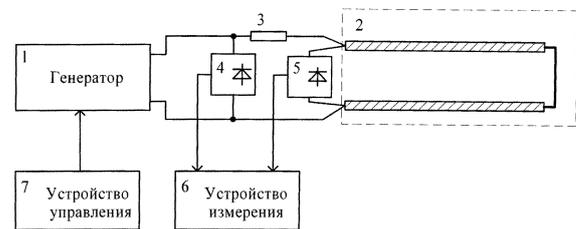
FIELD: measurement equipment.

SUBSTANCE: technical solution relates to measurement equipment and is designed to measure dielectric permeability and moisture of material. The method includes measurement of probing signal voltage in an inlet circuit of a primary converter, filled with monitored material, besides, the primary converter is made in the form of a section of a long line shorted at the end. Measurements of voltage are carried out simultaneously in two points: directly at the inlet of the converter and on the resistor connected between the generator and the converter. The generator is tuned in the frequency range by discrete steps. At each step they calculate the ratio of voltage at the inlet of the primary converter to voltage at the inlet of the element, and by the minimum of this ratio they determine frequencies of harmonics during filling of the primary converter with air and during its filling with controlled material.

By values of frequencies of several harmonics they calculate the actual component of the material refraction index. An idle component of the refraction index is calculated by the value of voltage ratio at the inlet of the primary converter to voltage at the inlet of the resistor. Further they determine moisture and other physical parameters that influence the refraction index.

EFFECT: increased accuracy of measurements and expansion of functional capabilities.

7 cl, 5 dwg



Фиг. 1

RU 2 571 301 C2

RU 2 571 301 C2

Техническое решение относится к измерительной технике и предназначено для измерения диэлектрической проницаемости и влажности материалов. Техническое решение может быть также применено для контроля концентрации смеси веществ, плотности и других физических параметров, влияющих на диэлектрическую проницаемость.

Известен способ измерения физических параметров материала (Патент RU 2365903, опубл. 27.08.2009), при котором в измерительной длинной линии с оконечным первичным преобразователем, содержащим контролируемый материал, возбуждают с помощью генератора электромагнитные волны и принимают волны, отраженные от входа первичного преобразователя, измеряют их мощность относительно мощности падающих волн, а также измеряют температуру контролируемого материала, генератор перестраивают в диапазоне частот, при перестройке определяют значение экстремума относительной мощности отраженных волн и соответствующей ему частоты для контролируемого материала, сопоставляют эти значения с совокупностью значений экстремума и его частоты, измеренных для материала с известными параметрами, и по полученным результатам судят о физических параметрах контролируемого материала.

Как отмечено в описании к указанному патенту (RU 2365903), первичный преобразователь выполнен в виде отрезка длинной линии. На конце этот отрезок выполнен короткозамкнутым, а на его входе имеется стык с измерительной линией, благодаря чему преобразователь является резонатором. Добротность резонатора зависит от диэлектрических потерь в контролируемом материале и от коэффициента связи резонатора с измерительной линией. Для материалов с большими диэлектрическими потерями добротность резонатора низкая и резонанс выражен слабо. Для контроля таких материалов приходится увеличивать коэффициент связи преобразователя с измерительной линией, но в этом случае первичный преобразователь теряет свойства резонатора и частота экстремума сдвигается относительно резонансной частоты, при которой на длине преобразователя «укладывается» целое число полуволн. Экстремум (минимум) мощности отраженных волн достигается на частоте, на которой входное сопротивление преобразователя наиболее близко к волновому сопротивлению измерительной линии. Но входное сопротивление преобразователя зависит от множества параметров: действительной составляющей показателя преломления материала, диэлектрических потерь, конструкции стыка измерительной линии с первичным преобразователем, а также от волновых сопротивлений. Поэтому по измеренному в данном способе значению частоты экстремума невозможно определить показатель преломления непосредственно. Измерения производят путем сопоставления результатов измерения с градуировочными характеристиками устройства измерения - совокупностью значений экстремума и его частоты, измеренных в этом же устройстве для эталонного материала с известными параметрами.

Из-за указанных факторов данный способ измерения физических параметров материалов, обладающих диэлектрическими потерями, имеет низкую точность.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому способу является способ измерения физических параметров материала (Патент US 7944220, опубл. 17.05.2011), при котором измеряют напряжения зондирующего сигнала во входной цепи первичного преобразователя, выполненного в виде отрезка длинной линии с не менее чем двумя проводниками и заполняемого контролируемым материалом, причем зондирующий сигнал формируется генератором, между генератором и входом первичного преобразователя включены сенсорный элемент, имеющий активное сопротивление, и согласующий элемент, имеющий комплексное сопротивление.

Напряжения зондирующего сигнала измеряют с помощью двух или трех детекторов, один из которых включен в точке между генератором и сенсорным элементом на входе этого элемента, второй детектор включен на входе первичного преобразователя, третий детектор включен между сенсорным элементом и согласующим элементом. Измерения напряжений выполняют поочередно при заполнении первичного преобразователя эталонным материалом с известными параметрами и при заполнении первичного преобразователя контролируемым материалом.

В данном способе измерения выполняют на фиксированной частоте зондирующего сигнала. Заполняют первичный преобразователь эталонным материалом и подстраивают комплексное сопротивление согласующего элемента так, чтобы напряжение на входе согласующего элемента было близко к минимуму. Затем заполняют преобразователь контролируемым материалом и по изменению напряжения на входе согласующего элемента судят о влажности материала. Измерения по данному способу возможны только в узком динамическом диапазоне измеряемых параметров, при которых уход частоты минимума не превышает ширины амплитудно-частотной характеристики.

Недостатком данного способа также является и необходимость подстройки согласующего элемента. Так как точность измерения амплитуды высокочастотных сигналов по сравнению с точностью измерения частоты сравнительно низкая, то точность измерения физических параметров материала по этому способу также снижена.

Устройство измерения, реализующее данный способ, должно быть отградуировано на эталонных образцах материала с известными параметрами. Данный способ, как и предыдущий, позволяет определить показатель преломления материала только путем сравнения с результатами измерений эталонных материалов.

Целью предлагаемого технического решения является повышение точности измерений физических параметров материала и расширение функциональных возможностей, в том числе:

- расширение динамического диапазона измеряемых параметров, обеспечение измерения влажности (массовой доли влаги) во всем диапазоне от 0 до 100%;
- обеспечение измерения материалов с высокими диэлектрическими потерями, в том числе обладающих проводимостью, при сохранении точности;
- обеспечение измерения показателя преломления материала прямым методом;
- исключение необходимости использования эталонных образцов материала для градуировки устройства, реализующего указанный способ.

Поставленная цель в предлагаемом способе измерения физических параметров материала, при котором измеряют напряжения зондирующего сигнала во входной цепи первичного преобразователя, выполненного в виде отрезка длинной линии с не менее чем двумя проводниками и заполняемого контролируемым материалом, причем зондирующий сигнал формируется генератором, между генератором и входом первичного преобразователя включен элемент, имеющий активное сопротивление, а напряжения зондирующего сигнала измеряют с помощью двух детекторов, один из которых включен в точке между генератором и элементом на входе элемента, а второй включен непосредственно на входе первичного преобразователя, достигается тем, что генератор перестраивают в диапазоне частот дискретными шагами, на каждом шаге перестройки вычисляют отношение напряжения на входе первичного преобразователя к напряжению на входе элемента и по минимальным значениям указанных отношений определяют частоты гармоник, характеризующихся тем, что на частоте гармоники входное сопротивление первичного преобразователя достигает минимума. Измерения частот указанных гармоник выполняют поочередно при заполнении первичного

преобразователя воздухом и при заполнении первичного преобразователя контролируемым материалом, причем первичный преобразователь выполнен короткозамкнутым на конце. По полученным в результате указанных измерений значениям частот гармоник определяют физические параметры материала.

5 Необходимо отметить, что частоту гармоники определяют по минимуму отношения напряжения на входе первичного преобразователя к напряжению на входе элемента, так как указанное отношение достигает минимума при минимальном значении входного сопротивления первичного преобразователя.

10 Измерения выполняют по шагам на дискретных частотах, результаты измерений запоминают, это позволяет выделить частоты, расположенные вокруг частоты гармоники, на которых значения отношения напряжений одинаковы. Поставленная цель достигается также тем, что в предложенном способе частоту гармоники определяют путем вычисления среднего значения двух частот, характеризующихся тем, что значения отношения напряжений на этих частотах равны, одна из этих частот находится ниже 15 частоты гармоники, а вторая частота превышает частоту гармоники.

Другой вариант нахождения частоты гармоники состоит в том, что по измеренным отношениям напряжений для дискретных частот формируют аппроксимирующую математическую функцию и значение частоты гармоники определяют путем вычисления минимума этой функции. Этот вариант нахождения частоты гармоники позволяет 20 уменьшить количество дискретных частот, на которых выполняют измерения, за счет увеличения шага перестройки частоты, и тем самым сократить время измерения.

При использовании аппроксимирующей функции поставленная цель достигается также тем, что в предложенном способе определяют отношения напряжений для дискретных частот путем многократных измерений отношения отдельно на каждой из 25 этих частот и их усреднения по времени. Усреднение измеренных отношений позволяет исключить влияние на результаты измерений импульсных помех, вызванных, например, прохождением лопаток вблизи первичного преобразователя при измерении в бетоносмесителе.

Поставленная цель достигается также тем, что в предложенном способе определяют 30 действительную составляющую показателя преломления материала по значениям частот не менее чем двух гармоник, измеренных при заполнении первичного преобразователя поочередно контролируемым материалом и воздухом. По величине отношения напряжения на входе первичного преобразователя к напряжению на входе элемента, измеренных при заполнении преобразователя материалом, и сопротивлению 35 элемента вычисляют мнимую составляющую показателя преломления материала. Причем для определения мнимой составляющей измерения выполняют на частоте нижней, но ненулевой гармоники, например на частоте первой гармоники.

Значение действительной составляющей показателя преломления материала определяют прямым методом - непосредственно по измеренным частотам без 40 необходимости градуировки устройства, реализующего способ. По результатам измерения показателя преломления вычисляют диэлектрическую проницаемость материала или другие физические параметры, связанные с показателем преломления. Для нахождения влажности кроме показателя преломления измеряют также температуру материала. Определяют влажность на основе таблиц или соотношений, составленных 45 для каждого вида материала и представляющих собой зависимости действительной составляющей показателя преломления материала от его влажности при разных температурах. Отметим, что устройство измерения, реализующее данный способ, не нуждается в градуировке по эталонным материалам. Для определения влажности

материала необходимы лишь данные по самому материалу. Результаты измерений влажности не зависят от конструктивных особенностей устройства, например, от размеров его преобразователя.

Поставленная цель достигается также тем, что в предложенном способе действительную составляющую показателя преломления материала определяют по значениям частот не менее чем двух гармоник, при этом для каждой из гармоник, за исключением нулевой, определяют отношение ее частоты, измеренной при заполнении первичного преобразователя воздухом, к ее частоте, измеренной при заполнении первичного преобразователя контролируемым материалом, определяют среднее значение указанных отношений и по нему вычисляют действительную составляющую показателя преломления материала.

Указанное среднее значение отношений вычисляют как среднее арифметическое:

$$n = \left(\sum_{i=1}^m \frac{f_i^B}{f_i^M} \right) / m ,$$

где n - действительная составляющая показателя преломления материала;
 m - количество измеренных гармоник;

f_i^B , f_i^M - частоты гармоники с номером $i \neq 0$ при заполнении первичного преобразователя, соответственно, воздухом и контролируемым материалом.

Указанное среднее значение отношений также может быть вычислено как среднее геометрическое:

$$n = \left(\prod_{i=1}^m \frac{f_i^B}{f_i^M} \right)^{\frac{1}{m}} .$$

Указанное среднее значение отношений также может быть вычислено как среднее квадратическое:

$$n = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{f_i^B}{f_i^M} \right)^2 \right] / m} .$$

Различия в результатах вычислений по этим выражениям, как показала экспериментальная проверка, пренебрежимо малы. Необходимо отметить, что номер гармоники i - это количество полуволн напряжения, «укладывающихся» на длине отрезка линии передачи первичного преобразователя.

Альтернативный метод определения параметров материала по результатам измерения частот нескольких гармоник основывается на вычислении разности этих частот. Действительную составляющую показателя преломления материала определяют по значениям частот не менее чем двух гармоник с помощью следующего математического выражения:

$$n = \frac{f_i^B - f_j^B}{f_i^M - f_j^M} ,$$

где n - действительная составляющая показателя преломления материала;
 i, j - номера гармоник, причем $i \neq j$;

f_i^M , f_j^M - частоты гармоник с номерами i, j при заполнении первичного преобразователя контролируемым материалом;

f_i^B, f_j^B - частоты гармоник с номерами i, j при заполнении первичного преобразователя воздухом.

5 Путем вычисления разности частот уменьшают аддитивную ошибку измерения частоты каждой из гармоник. Причем если номера гармоник i, j отличаются больше, чем на единицу, то вычисления по приведенному математическому выражению эквивалентны нахождению среднего значения разностей соседних частот всех измеренных гармоник.

10 С увеличением числа измеряемых гармоник уменьшается погрешность определения показателя преломления. Для произвольного числа (но не меньшего двух) измеренных гармоник последнее приведенное математическое выражение принимает вид:

$$n = \frac{(f_i^B - f_j^B) + (f_{i+1}^B - f_j^B) + \dots + (f_{i+m}^B - f_j^B)}{(f_i^M - f_j^M) + (f_{i+1}^M - f_j^M) + \dots + (f_{i+m}^M - f_j^M)}.$$

15 Мнимую составляющую показателя преломления материала вычисляют с помощью следующего математического выражения:

$$k \cong \left[\frac{U_{\text{пп}}^M}{U_{\text{эл}}^M - U_{\text{пп}}^M} \times R_{\text{эл}} \right] \times \frac{n^2}{\pi \rho_0},$$

20 где k, n - мнимая и действительная составляющие показателя преломления материала; $U_{\text{эл}}^M, U_{\text{пл}}^M$ - напряжения зондирующего сигнала на частоте первой гармоники, измеренные, соответственно, на входе элемента и на входе первичного преобразователя при заполнении первичного преобразователя контролируемым материалом;

$R_{\text{эл}}$ - омическое сопротивление элемента;

25 π - число 3,14159...;

ρ_0 - волновое сопротивление отрезка длиной линии первичного преобразователя, заполненного воздухом.

30 Отметим, что выражение в квадратных скобках представляет собой входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ первичного преобразователя на частоте гармоники:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{пп}}^M}{U_{\text{эл}}^M - U_{\text{пп}}^M} \times R_{\text{эл}}.$$

35 По действительной n и мнимой k составляющим показателя преломления материала вычисляют комплексную диэлектрическую проницаемость - ее действительную ϵ' и мнимую ϵ'' составляющие - с помощью следующих математических выражений:

$$\begin{aligned} \epsilon' &= n^2 - k^2, \\ \epsilon'' &= 2nk. \end{aligned}$$

40 Особенность предлагаемого способа состоит в том, что измерение амплитуд сигналов заменено измерением частот, что повышает точность измерений.

Вторая особенность: измерение частот выполняют при минимуме входного сопротивления и определяют этот минимум путем измерения напряжения непосредственно на входе преобразователя. Такое решение практически полностью исключает влияние на результаты измерения конструкции стыка и паразитных реактивностей на входе первичного преобразователя. Последнее утверждение хотелось бы выделить: так как измерения производятся при минимуме входного сопротивления, то низкое входное сопротивление шунтирует паразитные реактивности, вносимые в точку измерения конструкцией стыка и элементами тракта. Указанное шунтирование

обуславливает достижение высокой точности измерений.

На измеряемые по данному способу частоты гармоник не влияют величины волнового сопротивления первичного преобразователя и подводящей сигнал линии передачи (кабеля).

5 Еще одна особенность предлагаемого способа состоит в том, что при измерении определяют частоты нескольких гармоник. Это также обеспечивает преимущество предлагаемого способа перед известными. Измерение частот нескольких гармоник, как показали результаты экспериментов, позволяет скомпенсировать ошибки, получаемые при измерении каждой из гармоник в отдельности и вызванные, например, 10 неоднородным заполнением первичного преобразователя или неоднородным распределением влажности по объему преобразователя. Необходимая в большинстве практических случаев точность достигается при использовании в вычислениях значений частот нижних двух-трех гармоник.

Особенностью предлагаемого способа также является измерение комплексного 15 показателя преломления, то есть определяют не только действительную, но и мнимую составляющие этого параметра.

Существенным признаком способа является выполнение измерений посредством первичного преобразователя с короткозамкнутыми на конце проводниками. В таком преобразователе устранено влияние на измерения паразитной емкости на конце линии 20 передачи, характерное для преобразователей с разомкнутыми проводниками. Благодаря замыканию обеспечивается возможность определения действительной составляющей показателя преломления непосредственно, без градуировки на эталонных материалах устройства, реализующего данный способ.

Также существенным признаком способа является выполнение измерений по шагам 25 путем перебора дискретных частот. Это решение позволяет по завершении цикла перестройки произвести математическую обработку результатов измерений и повысить точность измерения частот гармоник. Для уменьшения времени измерений число дискретных частот должно быть уменьшено, в этом случае для сохранения точности частоту гармоники определяют по минимуму аппроксимирующей функции. Для частной 30 задачи, например, для определения содержания воды в бетонной смеси непосредственно в работающем смесителе, измерения отношения напряжений проводят на сравнительно небольшом количестве дискретных частот, что позволяет применить усреднение результатов по времени для каждой из частот. Частоту гармоники определяют по минимуму аппроксимирующей функции, построенной по усредненным результатам 35 измерений.

Особенностью предлагаемого способа является и вычисление отношения напряжения на входе первичного преобразователя к напряжению на входе элемента, что необходимо для исключения влияния нестабильности амплитуды генератора. В прототипе 40 нестабильность генератора уменьшают с помощью цепей автоматической регулировки мощности (АРМ). При измерениях в диапазоне частот инерционность АРМ резко замедляет перестройку, приводит к ошибкам. Измерение отношения устраняет этот недостаток.

На фиг.1 приведена схема измерительного устройства, реализующего предлагаемый способ. Здесь введены обозначения:

- 45 1 - генератор зондирующего сигнала, перестраиваемый в диапазоне частот;
2 - первичный преобразователь (зонд), выполненный в виде отрезка длиной линии с не менее чем двумя проводниками, причем отрезок длиной линии, образующий первичный преобразователь, выполнен короткозамкнутым на конце (его проводники

на конце соединены между собой так, что в месте их соединения образован электрический контакт);

3 - элемент, имеющий активное сопротивление и включенный между генератором 1 и первичным преобразователем 2;

5 4, 5 - первый и второй детекторы, предназначенные для измерения напряжения зондирующего сигнала, причем первый детектор 4 включен в точке между генератором 1 и элементом 3 на входе этого элемента, а второй детектор 5 включен непосредственно на входе первичного преобразователя 2.

6 - устройство измерения;

10 7 - устройство управления частотой генератора.

На фиг.2 приведен график зависимости отношения напряжения $U_{\text{ПП}}$ на входе преобразователя 2 к напряжению $U_{\text{ЭЛ}}$ на входе элемента 3 в зависимости от частоты генератора 1. Значения частот гармоник, на которых указанное отношение достигает минимума при измерениях в воздухе и в материале, отмечены, соответственно, через
15 f_i^B и f_i^M .

На фиг.3 показан график периодической перестройки частоты f генератора 1 во времени t с периодом T .

На фиг.4 проиллюстрирован метод нахождения значения частоты гармоник f_i как
20 среднего значения от частот f_a и f_b , характеризующихся тем, что значения отношения $U_{\text{ПП}}/U_{\text{ЭЛ}}$ напряжений на этих частотах равны, частота f_a - ниже частоты гармоник f_i , а частота f_b - выше ее.

На фиг.5 проиллюстрирован метод нахождения значения частоты гармоник f_i по
25 минимуму аппроксимирующей функции, построенной по результатам измерений на четырех дискретных частотах: f_a, f_b, f_c, f_d .

Измерительное устройство, реализующее предложенный способ, работает следующим образом. Генератор 1 с помощью устройства управления 7 периодически перестраивают в диапазоне рабочих частот дискретными шагами Δt с периодом T . Сформированный
30 генератором 1 зондирующий сигнал подают в первичный преобразователь 2 через элемент 3, имеющий активное сопротивление $R_{\text{ЭЛ}}$. В качестве элемента 3 может быть использован безындуктивный резистор, например, типа С2-10. В точке между генератором 1 и элементом 3 на входе элемента измеряют напряжение $U_{\text{ЭЛ}}$ с помощью
35 включенного в эту точку детектора 4. Вторым детектором 5, подключенным непосредственно к входу первичного преобразователя 2, измеряют напряжение $U_{\text{ПП}}$ на входе преобразователя. Детекторы 4, 5 преобразуют высокочастотные сигналы в низкочастотные и могут быть выполнены на основе полупроводниковых диодов. Сигналы детекторов 4, 5 подают в устройство измерения 6, где производится вычисление
40 отношения напряжений $U_{\text{ПП}}/U_{\text{ЭЛ}}$. На каждом шаге Δt полученное значение отношения запоминают в процессоре устройства измерения 6, одновременно в память процессора заносят значение частоты для этого шага. По завершении цикла перестройки выполняют математическую обработку результатов измерений, получают полную частотную
45 характеристику входного сопротивления первичного преобразователя в диапазоне частот. Определяют частоты, на которых отношение $U_{\text{ПП}}/U_{\text{ЭЛ}}$ достигает минимума и, соответственно, достигает минимума входное сопротивление первичного преобразователя 2.

Найденные частоты являются частотами гармоник f_i , причем номер гармоники i

равен количеству полуволн, «укладывающихся» на длине преобразователя 2. Измерения частот гармоник выполняют поочередно при заполнении первичного преобразователя 2 воздухом и при заполнении первичного преобразователя 2 контролируемым материалом, причем измеряют не менее двух гармоник.

5 Измерения частот гармоник f_1^B при воздушном заполнении преобразователя 2 достаточно выполнить один раз при изготовлении прибора и эти данные занести в память процессора устройства измерения 6. При эксплуатации прибора повторное измерение при воздушном заполнении преобразователя может потребоваться только для метрологической поверки.

10 Действительную составляющую n показателя преломления вычисляют по измеренным частотам гармоник на основании приведенных выше математических выражений. Параметр n в технической литературе также называют коэффициентом замедления или коэффициентом укорочения длины волны.

15 Мнимую составляющую k показателя преломления определяют при заполнении преобразователя 2 контролируемым материалом по величине отношения $U_{\text{пп}}/U_{\text{эл}}$ на частоте гармоник и известной величине сопротивления $R_{\text{эл}}$ элемента 3. Математическое выражение для вычисления мнимой составляющей k по результатам измерений первой гармоник приведено выше. По величине k вычисляют тангенс диэлектрических потерь.

20 По измеренным значениям k , n и температуре материала определяют его влажность или другие физические параметры, влияющие на коэффициент преломления, например, концентрацию смеси веществ, плотность.

25 Необходимо отметить, что для определения физических параметров материала по значению его показателя преломления достаточно иметь характеристики самого материала, градуировка устройства измерения не производится. Замена одного устройства, реализующего данный способ, на другое устройство с иными геометрическими и конструктивными параметрами, но реализующее тот же способ, не приводит к необходимости градуировки.

30 Рассмотрим критерии выбора диапазона частот перестройки генератора 1 и величины сопротивления элемента 3.

Для измерения влажности верхняя частота диапазона не должна превышать 1...2 ГГц, в этом случае действительная составляющая показателя преломления пленочной и капиллярной воды не зависит от частоты зондирующего сигнала (см., например, описание к патенту RU 2467314, опубл. 20.11.2012). Нижняя частота диапазона 35 определяется длиной первичного преобразователя и максимальным значением показателя преломления контролируемого материала. Например, для первичного преобразователя длиной 250 мм перестройка генератора 1 должна производиться в полосе частот, примерно, от 100 МГц до 620 МГц. Здесь нижняя граница полосы перестройки определена для случая увеличения коэффициента замедления до 5...6.

40 Величина сопротивления $R_{\text{эл}}$ элемента 3 выбирается исходя из того, что слишком малое его значение ухудшит чувствительность нахождения минимума, а чрезмерно большое - приведет к потере в точности измерения сигнала в минимуме. В опытных образцах измерителя влажности оптимальные результаты получены с номиналом резистора в пределах 20...51 Ом.

45 Испытания образцов влагомера, реализующего предложенный способ, производились на речном песке, карбонатном щебне, гранитном гравии, а также водомазутной эмульсии. Для измерения влажности использовался первичный преобразователь, имеющий длину 250 мм. Для этого первичного преобразователя при заполнении его

преломления материала, измеряют температуру материала и по этим данным определяют влажность или другие физические параметры материала.

6. Способ измерения физических параметров материала по одному (любому) из пп.1-4, отличающийся тем, что действительную составляющую показателя преломления материала определяют по значениям частот не менее чем двух гармоник, при этом для каждой из гармоник определяют отношение ее частоты, измеренной при заполнении первичного преобразователя воздухом, к ее частоте, измеренной при заполнении первичного преобразователя контролируемым материалом, определяют среднее значение указанных отношений по измеренным гармоникам и по нему вычисляют действительную составляющую показателя преломления материала с помощью следующих математических выражений:

$$n = \left(\sum_{i=1}^m \frac{f_i^B}{f_i^M} \right) / m ,$$

или

$$n = \left(\prod_{i=1}^m \frac{f_i^B}{f_i^M} \right)^{\frac{1}{m}} ,$$

или

$$n = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{f_i^B}{f_i^M} \right)^2 \right]} / m ,$$

где n - действительная составляющая показателя преломления материала;

m - количество измеренных гармоник;

f_i^B , f_i^M - частоты гармоники с номером $i \neq 0$ при заполнении первичного преобразователя, соответственно, воздухом и контролируемым материалом.

7. Способ измерения физических параметров материала по одному (любому) из пп.1-4, отличающийся тем, что действительную составляющую показателя преломления материала определяют по значениям частот не менее чем двух гармоник с помощью следующего математического выражения:

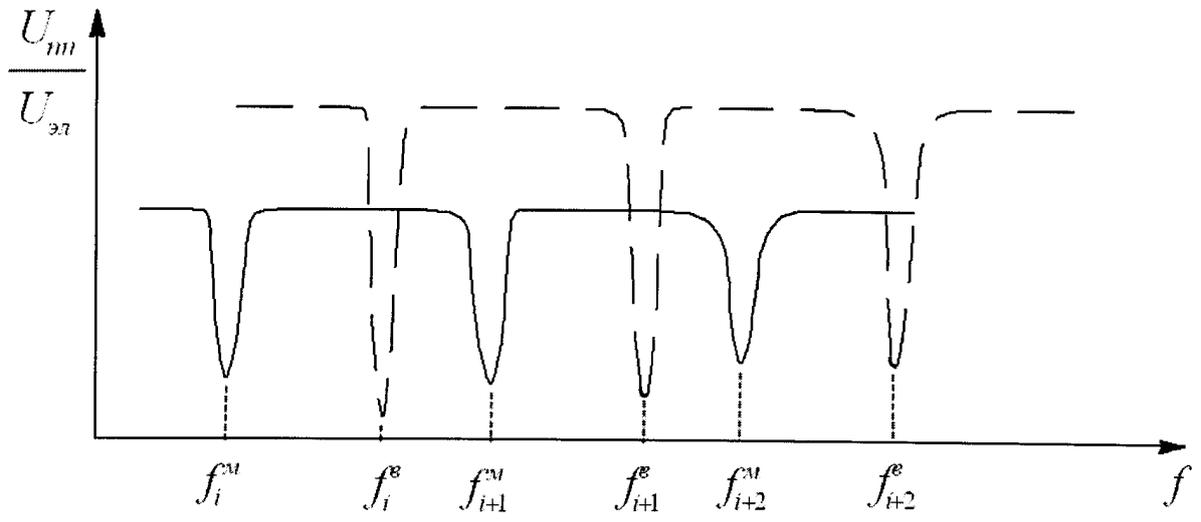
$$n = \frac{f_i^B - f_j^B}{f_i^M - f_j^M} ,$$

где n - действительная составляющая показателя преломления материала;

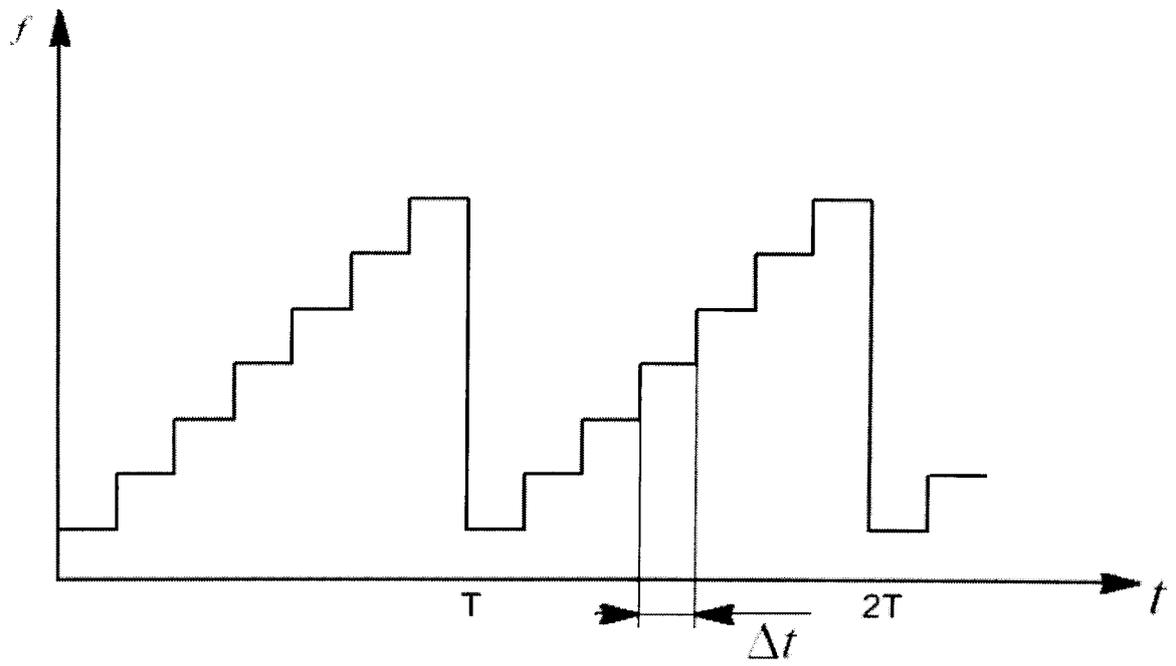
i, j - номера гармоник, причем $i \neq j$;

f_i^M , f_j^M - частоты гармоник с номерами i, j при заполнении первичного преобразователя контролируемым материалом;

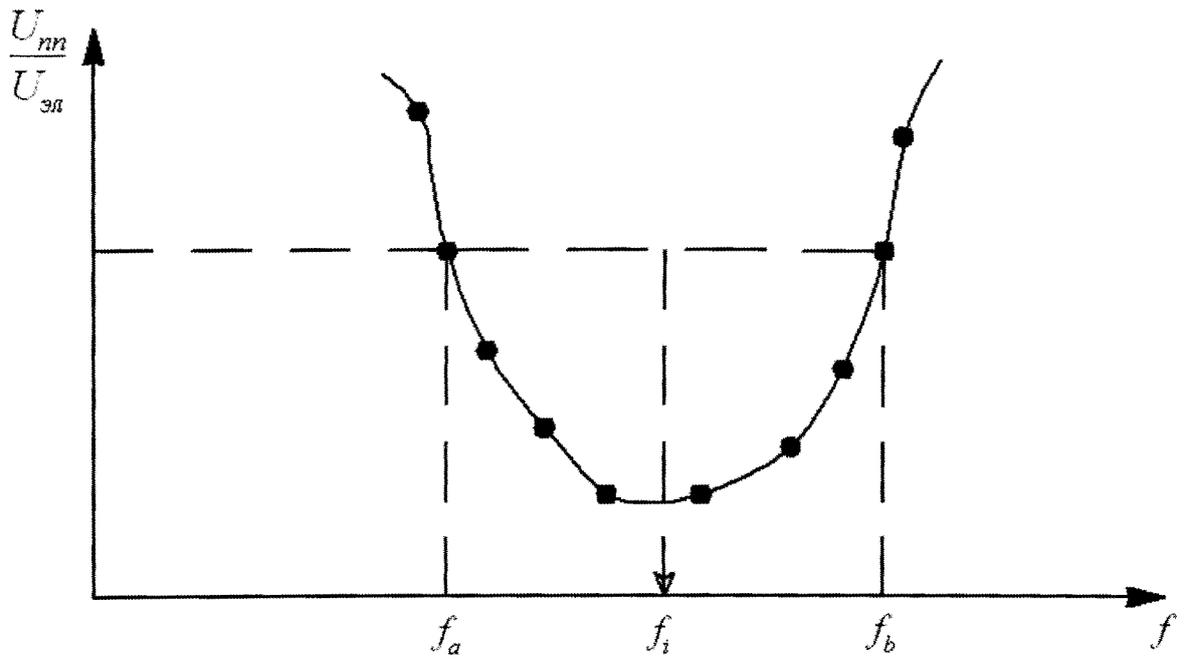
f_i^B , f_j^B - частоты гармоник с номерами i, j при заполнении первичного преобразователя воздухом.



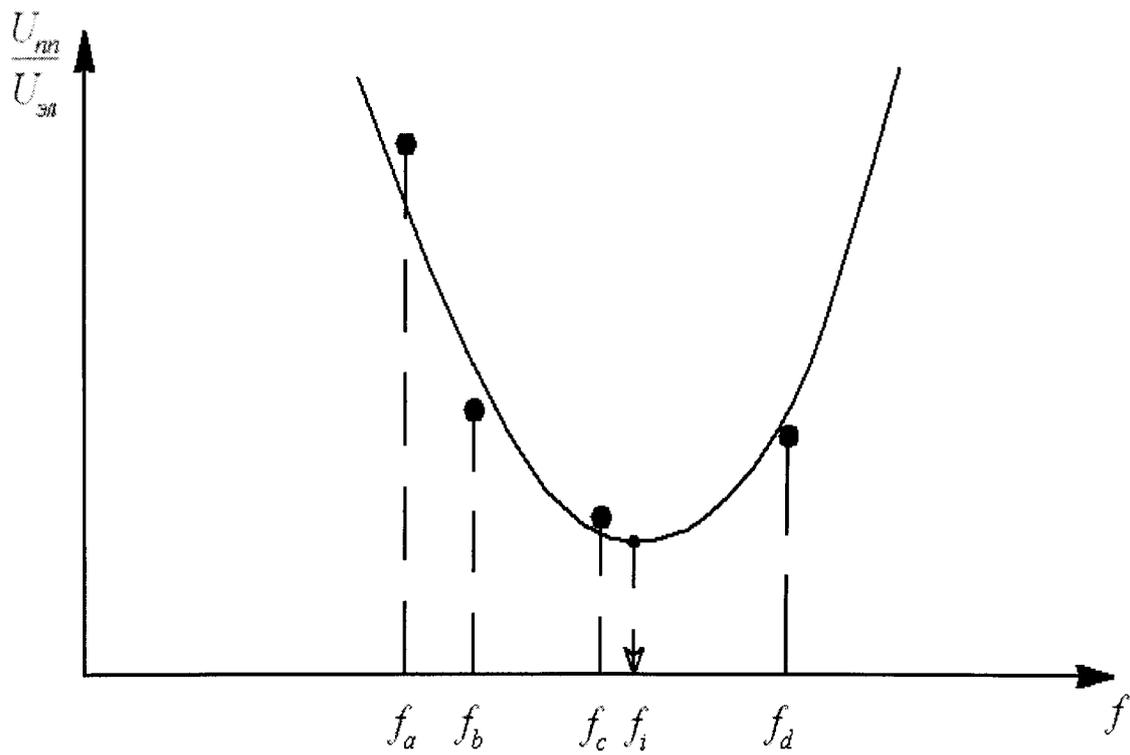
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5