



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 55453

(13) C2

(51) 7 G01N27/22

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ

1

2

(21) 99116350

(22) 23 11 1999

(24) 15 04 2003

(46) 15 04 2003, Бюл. №4, 2003 р.

(72) Рудик Андрій Вікторович

(73) ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

(56) RU 94042610, МПК G 01 N 27/22, публ.
27 09 1996

SU 1718089, МПК G 01 N 27/22, публ. 07 03 1992

Супьян В.Я. и др. Методы и средства измерения
влажности капиллярно-пористых материалов//в
книге "Радиотехнические устройства контроля и
обработки информации", К. УМК ВО, 1992, с. 71

(57) 1 Спосіб вимірювання вологості, який полягає
в тому, що в послідовному колі з повного ємнісного
датчика вологості та зразкового ємнісного елемен-
та вимірюють значення кута фазового зсуву між
напрягами на повному ємнісному датчику воло-
гості та зразковому ємнісному елементі, який
відрізняється тим, що спочатку вимірюють значення
відношення напруг на повному ємнісному
датчику вологості та зразковому ємнісному еле-
менті, а потім - значення кута фазового зсуву між
напрягами на пустому ємнісному датчику вологості
та зразковому ємнісному елементі і значення
відношення напруг на пустому ємнісному датчику
вологості та зразковому ємнісному елементі, при
цьому вологість визначають за формулою

$$W = K \sqrt{R_M^2 + X_{C_M}^2} = K X_0 \sqrt{\left(\frac{A_2}{\sin \varphi_2} - \frac{A_1}{\cos \varphi_1}\right)^2 + \left(\frac{A_1 A_2}{A_1 \cos \varphi_2 - A_2 \sin \varphi_1}\right)^2}$$

де

K - коефіцієнт пропорційності,

R_M - опір діелектричних втрат досліджуваного ма-
теріалу,

C_M - еквівалентна ємність досліджуваного ма-
теріалу,

$X_{C_M} = \frac{1}{\omega C_M}$ - ємнісний опір досліджуваного ма-
теріалу,

теріалу,

$X_0 = \frac{1}{\omega C_0}$ - ємнісний опір зразкового елементу

(конденсатора).

A₁ - відношення напруг на пустому ємнісному дат-
чику вологості та зразковому ємнісному елементі,

φ₁ - кут фазового зсуву між напругами на пустому
ємнісному датчику вологості та зразковому
ємнісному елементі,

A₂ - відношення напруг на повному ємнісному дат-
чику вологості та зразковому ємнісному елементі,

φ₂ - кут фазового зсуву між напругами на повному
ємнісному датчику вологості та зразковому
ємнісному елементі

2 Пристрій для вимірювання вологості, що містить
два кварцових генератора, виходи яких підключені
до входів першого комутатора, вимірювального
перетворювача з досліджуванним матеріалом, вхід
якого підключений до виходу першого комутатора,
та аналого-цифровий перетворювач, який
відрізняється тим, що в нього введені пустий
вимірювальний перетворювач, другий комутатор,
цифровий фазометр, вимірювач відношення
амплітуд і пристрій обчислення та управління, при
цьому вхід пустого вимірювального перетворюва-
ча підключений до виходу першого комутатора,
виходи пустого вимірювального перетворювача та
вимірювального перетворювача з досліджуванним
матеріалом через другий комутатор підключені до
входів цифрового фазометра та вимірювача
відношення амплітуд, вихід вимірювача
відношення амплітуд підключений до входу анало-
го-цифрового перетворювача, виходи цифрового
фазометра та аналого-цифрового перетворювача
підключені до входів пристрою обчислення та
управління, а вихід пристрою обчислення та
управління підключений до керуючих входів пер-
шого та другого комутаторів

Винахід відноситься до вимірювальної техні-
ки та може використовуватися для визначення

вмісту вологи в різних шпаристих або сипучих
матеріалах, наприклад, хлібі або зерні

Відомий спосіб вимірювання вологості шля-

(13) C2

(11) 55453

(19) UA

хом визначення фазового зсуву між напругою на зразковому елементі та стабілізованю за амплітудою напругою ємнісного перетворювача і наступного обчислення значення ємності, пропорційного вологості, який реалізований в ємнісному вологомірі [Авт св СССР №734548, м к л G01N 27/22 Бюл №6, 1980]

Недоліками вказаного способу є залежність фазового зсуву між напругою на зразковому елементі та напругою на ємнісному перетворювачі від опору діелектричних втрат. Тому що фазовий зсув входить в співвідношення для визначення ємності перетворювача, за значенням якої обчислюють вологість, то результат визначення вологості сильно залежить від діелектричних втрат, що зменшує точність вимірювання.

За прототип обраний спосіб вимірювання вологості [Авт св СССР №1718089, м к л G01N 27/22 Бюл №9, 1992], який полягає в тому, що в послідовному колі, яке складається з ємнісного датчика вологості та зразкового елемента, вимірюють значення фазового зсуву між напругами на зразковому елементі та датчику, а з метою підвищення точності вимірювань додатково вимірюють значення напруги на зразковому елементі.

Недоліком вказаного способу є те, що на результат вимірювання вологості суттєво впливають ємність та опір діелектричних втрат пустого ємнісного датчика вологості, що призводить до збільшення похибки вимірювання вологості.

Відомий пристрій для вимірювання вологості (Супьян В Я, Куцевол Н А, Крушевский Ю В. Методы и средства измерения влажности капиллярно-пористых материалов // В кн "Радиотехнические устройства контроля и обработки информации" - К УМК ВО, 1992 - С 71), який складається з двох кварцових генераторів гармонічних коливань, перемикача, вимірювального перетворювача (послідовного коливального контуру), індикатора резонансу та арифметичного пристрою.

Недоліком вказаного пристрою є те, що при вимірюванні вологості капиллярно-шпаристих матеріалів з великими та нестабільними втратами добротність послідовного коливального контуру при заповненні чутливого елемента досліджуванним матеріалом стає дуже малою. При цьому визначення моменту резонансу супроводжується значними труднощами та не виключає значних неточностей, що призводить до великих похибок при визначенні вологості.

За прототип обраний пристрій для вимірювання вологості (Супьян В Я, Куцевол Н А, Крушевский Ю В. Методы и средства измерения влажности капиллярно-пористых материалов // В кн "Радиотехнические устройства контроля и обработки информации" - К УМК ВО, 1992 - С 77), який складається з двох кварцових генераторів гармонічних коливань, перемикача, який далі будемо називати комутатором, вимірювального перетворювача (послідовно включених зразкового конденсатора та чутливого елемента), пристрою автоматичного регулювання амплітуди вихідної напруги кварцових генераторів гармонічних коливань, вольтметра, фазометра, аналого-цифрового перетворювача та арифметичного

пристрою.

Недоліком вказаного пристрою є те, що на результат вимірювання вологості суттєво впливають ємність та опір діелектричних втрат пустого ємнісного датчика вологості, що призводить до збільшення похибки вимірювання вологості.

В основу винаходу покладена задача вдосконалення способу вимірювання вологості, в якому за рахунок того, що додатково вимірюють значення відношення напруг на повному ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, значення кута фазового зсуву між напругами на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, а також значення відношення напруг на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, забезпечується зменшення похибки вимірювання, і за рахунок цього підвищується точність вимірювання вологості.

В основу винаходу покладена задача вдосконалення пристрою для вимірювання вологості, в якому за рахунок введення пустого вимірювального перетворювача, другого комутатора, цифрового фазометра, вимірювача відношення амплітуд і пристрою обчислення та управління забезпечується зменшення похибки вимірювання, і за рахунок цього підвищується точність вимірювання вологості.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі вимірювання вологості, при якому в послідовному колі з повного ємнісного датчика вологості та зразкового ємнісного елемента вимірюють значення кута фазового зсуву між напругами на повному ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, згідно винаходу спочатку додатково вимірюють значення відношення напруг на повному ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, а потім - значення кута фазового зсуву між напругами на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі і значення відношення напруг на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, при цьому вологість визначають за формулою

$$W = K \sqrt{R_M^2 + X_{C_0}^2} = K X_{C_0} \sqrt{\left(\frac{A_2}{\sin \varphi_2} - \frac{A_1}{\cos \varphi_1}\right)^2 + \left(\frac{A_1 A_2}{A_1 \cos \varphi_2 - A_2 \sin \varphi_1}\right)^2}$$

де K - коефіцієнт пропорційності,

R_M - опір діелектричних втрат досліджуваного матеріалу,

C_0 - еквівалентна ємність досліджуваного матеріалу,

$$X_{C_0} = \frac{1}{\omega C_0} - \text{ємнісний опір зразкового елемента (конденсатора),}$$

A_1 - відношення напруг на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі,

φ_1 - кут фазового зсуву між напругами на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі,

A_2 - відношення напруг на повному ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі,

φ_2 - кут фазового зсуву між напругами на повному ємнісному датчику вологості та зразковому

ємнісному елементі

Введення операцій вимірювання значення відношення напруг на повному ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, значення кута фазового зсуву між напругами на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, а також значення відношення напруг на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, призводить до виключення впливу на результат вимірювання ємності та опорю діелектричних втрат пустого ємнісного датчика вологості (зменшення похибки вимірювання), і за рахунок цього підвищується точність вимірювання вологості

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої для вимірювання вологості, який містить два кварцових генератора, виходи яких підключені до входів першого комутатора, вимірювального перетворювача з досліджуванним матеріалом, вхід якого підключений до виходу першого комутатора, та аналого-цифровий перетворювач, згідно винаходу додатково введені пустий вимірювальний перетворювач, другий комутатор, цифровий фазометр, вимірювач відношення амплітуд і пристрій обчислення та управління, при цьому вхід пустого вимірювального перетворювача підключений до виходу першого комутатора, виходи пустого вимірювального перетворювача та вимірювального перетворювача з досліджуванним матеріалом через другий комутатор підключені до входів цифрового фазометра та вимірювача відношення амплітуд, вихід вимірювача відношення амплітуд підключений до входу аналого-цифрового перетворювача, виходи цифрового фазометра та аналого-цифрового перетворювача підключені до входів пристрою обчислення та управління, а вихід пристрою обчислення та управління підключений до керуючих входів першого та другого комутаторів

Введення у пристрій пустого вимірювального перетворювача, другого комутатора, цифрового фазометра, вимірювача відношення амплітуд і пристрою обчислення та управління призводить до виключення впливу на результат вимірювання ємності та опорю діелектричних втрат пустого ємнісного датчика вологості (зменшення похибки вимірювання), і за рахунок цього підвищується точність вимірювання вологості

На фіг 1 наведена узагальнена еквівалентна схема пустого ємнісного вимірювального пере-

творювача, на фіг 2 - узагальнена еквівалентна схема ємнісного вимірювального перетворювача з досліджуванним матеріалом, на фіг 3 - структурна схема пристрою для вимірювання вологості, що реалізує запропонований спосіб вимірювання

Спосіб вимірювання вологості полягає в тому, що в послідовному колі з повного ємнісного датчика вологості та зразкового ємнісного елементу спочатку вимірюють значення кута фазового зсуву між напругами на повному ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі і значення відношення напруг на повному ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі, а потім - значення кута фазового зсуву між напругами на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі і значення відношення напруг на пустому ємнісному датчику вологості та зразковому ємнісному елементі

Розглянемо узагальнену еквівалентну схему пустого вимірювального перетворювача, яка складається зі зразкового елементу Z_0 та ємнісного чутливого елементу (паралельно з'єднаних опорю діелектричних втрат R_d та еквівалентної ємності C_d пустого датчика), наведену на фіг 1

В якості зразкового елементу можуть використовуватися резистор з опором R_0 , конденсатор ємністю C_0 та котушка з індуктивністю L_0 Розглянемо варіант використання в якості зразкового елементу конденсатора

Вхідна напруга $\dot{U} = U_{вх} e^{j\omega t}$ викликає в зразковому елементі струм

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}_{вх}}{-jX_0 + \dot{Z}_d}, \quad (1)$$

де $\dot{Z}_d = \frac{-jX_{C_d} R_d}{R_d - jX_{C_d}}$ комплексний опір пустого

ємнісного чутливого елементу (датчика),

$$X_0 = \frac{1}{\omega C_0} \text{ та } X_{C_d} = \frac{1}{\omega C_d} - \text{відповідно}$$

ємнісні опори зразкового елементу (конденсатора) та еквівалентної ємності пустого датчика

Використовуючи співвідношення (1), можна визначити напруги на зразковому ємнісному елементі та пустому ємнісному датчику, які відповідно дорівнюють

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{0d} &= -jX_0 i_1 = \frac{jX_0 \dot{U}_{вх}}{jX_0 + \frac{jX_{C_d} R_d}{R_d - jX_{C_d}}} = \frac{\dot{U}_{вх}}{1 + \frac{X_{C_d} R_d}{X(R_d - jX_{C_d})}} = \frac{\dot{U}_{вх} X_0 (R_d - jX_{C_d})}{R_d (X_0 + X_{C_d}) - jX_0 X_{C_d}} = \\
 &= \frac{U_{вх} e^{j\varphi_{вх}} \cdot X_0 \sqrt{R_d^2 + X_{C_d}^2} \cdot e^{-j \arctg \frac{X_{C_d}}{R_d}}}{\sqrt{R_d^2 (X_0 + X_{C_d})^2 + X_0^2 X_{C_d}^2} \cdot e^{-j \arctg \frac{X_0 X_{C_d}}{R_d (X_0 + X_{C_d})}}} = \\
 &= \frac{U_{вх} X_0 \sqrt{R_d^2 + X_{C_d}^2}}{\sqrt{R_d^2 (X_0 + X_{C_d})^2 + X_0^2 X_{C_d}^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{вх} - \arctg \frac{X_{C_d}}{R_d} + \arctg \frac{X_0 X_{C_d}}{R_d (X_0 + X_{C_d})} \right\}},
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{Z_d} &= \dot{Z}_d i_1 = \frac{\dot{U}_{вх} \cdot \frac{-jX_{C_d} R_d}{R_d - jX_{C_d}}}{-jX_0 + \frac{-jX_{C_d} R_d}{R_d - jX_{C_d}}} = \frac{\dot{U}_{вх} X_{C_d} R_d}{R_d (X_0 + X_{C_d}) - jX_0 X_{C_d}} = \\
 &= \frac{U_{вх} e^{j\varphi_{вх}} \cdot X_{C_d} R_d}{\sqrt{R_d^2 (X_0 + X_{C_d})^2 + X_0^2 X_{C_d}^2} \cdot e^{-j \arctg \frac{X_0 X_{C_d}}{R_d (X_0 + X_{C_d})}}} = \\
 &= \frac{U_{вх} X_{C_d} R_d}{\sqrt{R_d^2 (X_0 + X_{C_d})^2 + X_0^2 X_{C_d}^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{вх} + \arctg \frac{X_0 X_{C_d}}{R_d (X_0 + X_{C_d})} \right\}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Знайдемо відношення цих напруг та фазовий зсув між ними

$$A_1 = \frac{|\dot{U}_{Z_d}|}{|\dot{U}_{0d}|} = \frac{X_{C_d} R_d}{X_0 \sqrt{R_d^2 + X_{C_d}^2}} = \frac{R_d}{X_0 \sqrt{1 + \frac{R_d^2}{X_{C_d}^2}}} = \frac{X_{C_d}}{X_0 \sqrt{1 + \frac{X_{C_d}^2}{R_d^2}}}, \tag{4}$$

$$\varphi_1 = \arg \{ \dot{U}_{Z_d} \} - \arg \{ \dot{U}_{0d} \} = \arctg \frac{X_{C_d}}{R_d} \tag{5}$$

Аналогічно розглянемо узагальнену еквівалентну схему вимірювального перетворювача з досліджуванним матеріалом, яка складається зі зразкового ємнісного елемента C_0 та ємнісного чутливого елемента, до складу якого додатково введені опір діелектричних втрат досліджуваного матеріалу R_M та еквівалентна ємність C_M досліджуваного матеріалу (див. фіг. 2)

В цьому випадку вхідна напруга $\dot{U}_{вх}$ буде викликати в зразковому елементі струм

$$i_1 = \frac{\dot{U}_{вх}}{-jX_0 + \dot{Z}_{дм}}, \tag{6}$$

$$\dot{Z}_{дм} = \frac{(R_d + R_M) \times \frac{1}{j\omega(C_d + C_M)}}{R_d + R_M + \frac{1}{j\omega(C_d + C_M)}} = \frac{R_d + R_M}{1 + \frac{(R_d + R_M)(X_{C_d} + X_{C_M})}{X_{C_d} X_{C_M}}}$$

- комплексний опір ємнісного датчика з досліджуваним матеріалом (речовиною)

Використовуючи співвідношення (6), можна визначити напруги на зразковому ємнісному елементі та ємнісному датчику з досліджуваним матеріалом, які відповідно дорівнюють

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0\text{ДМ}} = -jX_0 i_2 &= \frac{-jX_0 \dot{U}_{\text{ВХ}}}{-jX_0 + \frac{R_{\text{Д}} + R_{\text{М}}}{1 + j \frac{(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})(X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}})}{X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}}}} = \\ &= \frac{X_0 \dot{U}_{\text{ВХ}} \left\{ (X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}})(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}}) - jX_{\text{СД}} X_{\text{СМ}} \right\}}{(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})(X_0 X_{\text{СД}} + X_0 X_{\text{СМ}} + X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}) - jX_0 X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}} = \\ &= \frac{U_{\text{ВХ}} X_0 \sqrt{(X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}})^2 (R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})^2 + X_{\text{СД}}^2 X_{\text{СМ}}^2}}{\sqrt{(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})^2 (X_0 X_{\text{СД}} + X_0 X_{\text{СМ}} + X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}})^2 + X_0^2 X_{\text{СД}}^2 X_{\text{СМ}}^2}} \times \\ &\times e^{j \left\{ \varphi_{\text{ВХ}} - \arctg \frac{X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}}{(X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}})(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})} + \arctg \frac{X_0 X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}}{(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})(X_0 X_{\text{СД}} + X_0 X_{\text{СМ}} + X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}})} \right\}}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{ЗДМ}} = \dot{Z}_{\text{ДМ}} i_2 &= \frac{\dot{U}_{\text{ВХ}} \cdot \frac{R_{\text{Д}} + R_{\text{М}}}{1 + j \frac{(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})(X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}})}{X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}}}}{-jX_0 + \frac{R_{\text{Д}} + R_{\text{М}}}{1 + j \frac{(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})(X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}})}{X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}}}} = \\ &= \frac{\dot{U}_{\text{ВХ}} X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}} (R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})}{(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})(X_0 X_{\text{СД}} + X_0 X_{\text{СМ}} + X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}) - jX_0 X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}} = \\ &= \frac{U_{\text{ВХ}} X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}} (R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})}{\sqrt{(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})^2 (X_0 X_{\text{СД}} + X_0 X_{\text{СМ}} + X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}})^2 + X_0^2 X_{\text{СД}}^2 X_{\text{СМ}}^2}} \times \\ &\times e^{j \left\{ \varphi_{\text{ВХ}} + \arctg \frac{X_0 X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}}{(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})(X_0 X_{\text{СД}} + X_0 X_{\text{СМ}} + X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}})} \right\}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Знайдемо відношення напруг, що визначаються співвідношенням (7) та (8), а також фазовий зсув між цими напругами

$$A_2 = \frac{|\dot{U}_{\text{ЗДМ}}|}{|\dot{U}_{0\text{ДМ}}|} = \frac{X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}} (R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})}{X_0 \sqrt{(X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}})^2 (R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})^2 + X_{\text{СД}}^2 X_{\text{СМ}}^2}}; \quad (9)$$

$$\varphi_2 = \arg \left\{ \dot{U}_{\text{ЗДМ}} \right\} - \arg \left\{ \dot{U}_{0\text{ДМ}} \right\} = \arctg \left(\frac{X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}}}{(X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}})(R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})} \right). \quad (10)$$

Розглянувши сумісно два останніх співвідношення, можна записати

$$A_2 = \frac{X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}} (R_{\text{Д}} + R_{\text{М}})}{X_0 (X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}}) \sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi_2}} = \frac{X_{\text{СД}} X_{\text{СМ}} \cos \varphi_2}{X_0 (X_{\text{СД}} + X_{\text{СМ}})} \quad (11)$$

Враховуючи, що з співвідношень (4) та (5) $X_{\text{СД}} = \frac{A_1 X_0}{\sin \varphi_1}$, вирішимо співвідношення (11) відносно $X_{\text{СД}}$,

в результаті чого отримаємо

$$X_{C_d} = \frac{A_1 A_2 X_0}{A_1 \cos \varphi_2 - A_2 \sin \varphi_1} \quad (12)$$

Для того щоб знайти опір діелектричних втрат досліджуваного матеріалу R_M , перепишемо співвідношення (9) таким чином

$$A_2 = \frac{R_d + R_M}{X_0 \sqrt{1 + \left(\frac{(X_{C_d} + X_{C_M})(R_d + R_M)}{X_{C_d} X_{C_M}} \right)^2}} = \frac{R_d + R_M}{X_0 \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi_2}} = \frac{(R_d + R_M) \sin \varphi_2}{X_0} \quad (13)$$

Враховуючи, що з співвідношень (4) та (5) $R_d = \frac{A_1 X_0}{\cos \varphi_1}$, вирішимо співвідношення (13) відносно R_M , в результаті чого отримаємо

$$R_M = X_0 \left(\frac{A_2}{\sin \varphi_2} - \frac{A_1}{\cos \varphi_1} \right) = \frac{X_0 (A_2 \cos \varphi_1 - A_1 \sin \varphi_2)}{\sin \varphi_2 \cos \varphi_1} \quad (14)$$

Таким чином, виміривши відношення напруг на пустому чутливому елементі та зразковій ємності A_1 , фазовий зсув між цими напругами φ_1 , а також відношення напруг на повному чутливому елементі (з досліджуваним матеріалом) та аналогічній зразковій ємності A_2 і фазовий зсув між цими напругами φ_2 , можна за допомогою співвідношень (12) та (14) визначити вологість досліджуваного матеріалу, тобто

$$W = K \sqrt{R_M^2 + X_{C_M}^2} = K X_0 \sqrt{\left(\frac{A_2}{\sin \varphi_2} - \frac{A_1}{\cos \varphi_1} \right)^2 + \left(\frac{A_1 A_2}{A_1 \cos \varphi_2 - A_2 \sin \varphi_1} \right)^2} = \frac{K X_0 \sqrt{\frac{1}{4} (A_1^2 \sin 2\varphi_2 + A_2^2 \sin 2\varphi_1)^2 - A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) (A_1^2 \sin 2\varphi_2 + A_2^2 \sin 2\varphi_1 - A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1))}}{(A_1 \cos \varphi_2 - A_2 \sin \varphi_1) \sin \varphi_2 \cos \varphi_1} \quad (15)$$

Структурна схема вологоміру, в якому реалізується запропонований спосіб вимірювання, наведена на фіг 3

Пристрій, який реалізує запропонований спосіб вимірювання вологості, складається з кварцових генераторів 1 та 2, виходи яких підключені до входів першого комутатора 3, пустого вимірювального перетворювача 4 та вимірювального перетворювача з досліджуваним матеріалом 5, входи яких підключені до виходу першого комутатора 3, а виходи - до входів другого комутатора 6, цифрового фазометра 7 та вимірювача відношення амплітуд 8, входи яких підключені до виходів другого комутатора 6, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 9, вхід якого підключений до виходу вимірювача відношення амплітуд 8, та пристрою обчислення та управління (ПОУ) 10, входи якого підключені до виходів цифрового фазометра 7 та АЦП 9, а вихід - до керуючих входів першого 3 та другого 6 комутаторів

Пристрій, який реалізує запропонований спосіб вимірювання вологості, працює таким чином

Кварцові генератори 1 та 2 виробляють гармонічні сигнали з частотою відповідно f_1 та f_2 один з яких (наприклад, з частотою f_1) за допомогою першого комутатора 3 потрапляє на входи пустого вимірювального перетворювача 4 (послідовно включених зразкового конденсатора та пустого датчика) та вимірювального перетворювача з досліджуваним матеріалом 5 (послідовно включених зразкового конденсатора та датчика з досліджуваним матеріалом) Виходи вимірювальних перетво-

рювачів підключені до входів другого комутатора 6 В перший напівперіод комутації на вихід другого комутатора 6 (на входи цифрового фазометра 7 та вимірювача відношення амплітуд 8) потрапляють напруги з виходу пустого вимірювального перетворювача $4\dot{U}_{0d}$ та \dot{U}_{Zd} , між якими вимірюється

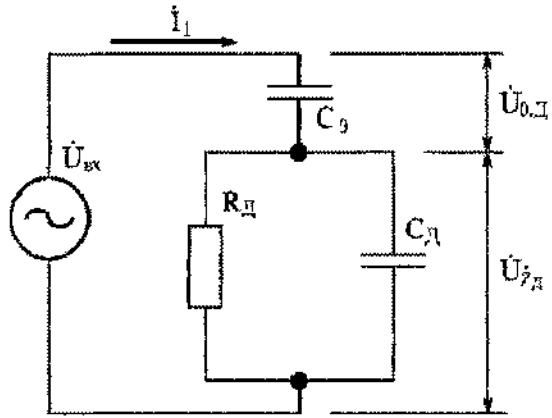
фазовий зсув φ_1 та відношення їх амплітуд A_1 Результат вимірювання відношення амплітуд за допомогою АЦП 9 перетворюється в цифровий код та разом з результатом вимірювання фазового зсуву потрапляє на ПОУ 10, де запам'ятовується В другий напівперіод комутації на вихід другого комутатора 6 потрапляють напруги з виходу вимірювального перетворювача з досліджуваним матеріалом $5\dot{U}_{0dm}$ та \dot{U}_{Zdm} , між якими вимірюється

фазовий зсув φ_2 та відношення їх амплітуд A_2 Результат вимірювання відношення амплітуд за допомогою АЦП 9 перетворюється в цифровий код та разом з результатом вимірювання фазового зсуву потрапляє на ПОУ 10, де за співвідношенням (15) відбувається обчислення результату вимірювання вологості досліджуваного матеріалу на частоті f_1 Для зменшення похибки від непостійності шпаристості (або густини упаковки матеріалу в датчику) вимірювання проводять на двох частотах, для чого на входи вимірювальних перетворювачів за допомогою першого комутатора 3 подається гармонічний сигнал з частотою f_2 і всі вимірювання повторюються на цій частоті

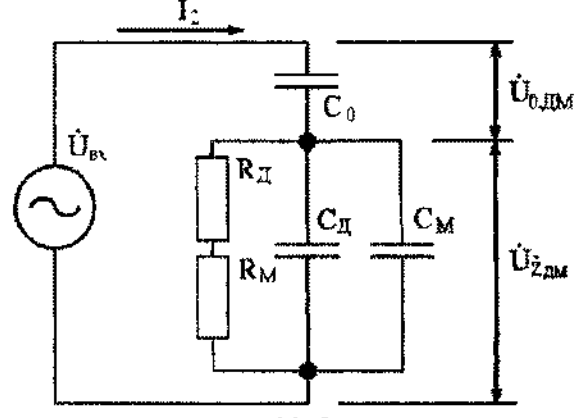
13

55453

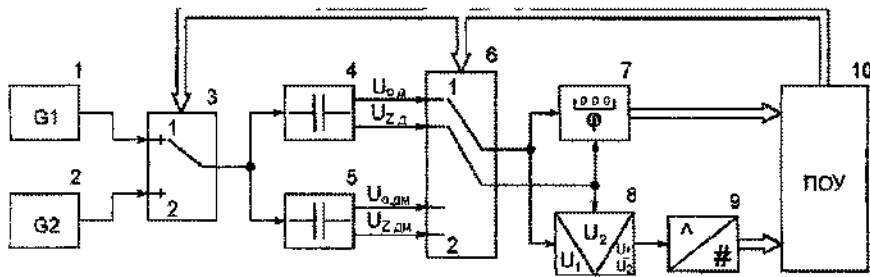
14



Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3