



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 38067

(13) A

(51) 7 G01N22/04

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) МІКРОХВИЛЬОВИЙ ВИМІРЮВАЧ ВОЛОГОСТІ

(21) 2000052974

(22) 24.05.2000

(24) 15.05.2001

(33) UA

(46) 15.05.2001, Бюл. № 4, 2001 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Марченко Інна Миколаївна

(73) Київський державний університет технологій та дизайну

(57) Мікрохвильовий вимірювач вологості, який має мікрохвильовий генератор, послідовно з'єднаний перший вентиль, перший тривходовий циркулятор, автоматичний переривач, другий вентиль, другий тривходовий циркулятор та приймально-передаючу антену, до вільного плеча першого тривходового циркулятора підключені з'єднані послідовно атенуатор, хвильоводний трійник і детекторна секція, другий вхід хвильоводного трійника з'єднаний з вільним плечем другого тривходового циркулятора, диференційний підсилювач і стабілізоване джерело постійної напруги, з'єднане з одним із входів диференційного підсилювача, і фазочутливий випрямляч, який **відрізняється** тим,

що в нього введені радіочастотний генератор, подільник частоти та амплітудний модулятор, який включений між виходом мікрохвильового генератора та входом першого вентиля, другий вхід амплітудного модулятора з'єднаний з виходом радіочастотного генератора та входом подільника частоти, вихід якого з'єднаний з другим входом автоматичного переривача та другим входом фазочутливого випрямляча, вихід якого з'єднаний з другим входом диференційного підсилювача, послідовно з'єднані керований резонансний підсилювач, амплітудний детектор, фільтр верхніх частот і підсилювач змінної напруги, вихід якого з'єднаний з входом фазочутливого випрямляча, інтегратор, включений між виходом диференційного підсилювача та другим входом керованого резонансного підсилювача, перший вхід якого підключений до виходу детекторної секції, а також послідовно з'єднані фільтр нижніх частот і аналого-цифровий перетворювач, при цьому вхід фільтра нижніх частот підключений до виходу амплітудного детектора, а вихід аналого-цифрового перетворювача є виходом мікрохвильового вимірювача вологості.

Винахід відноситься до галузі аналізу властивостей речовин за допомогою мікрохвиль та може бути використаний в якості лінійного вимірювального перетворювача вологості в електричний сигнал для систем автоматизації обладнання.

В якості вимірювальних перетворювачів вологості в електричний сигнал широке використання знаходять мікрохвильові вимірювачі, які мають такі переваги, як безконтактність, можливість інтегральної оцінки вологості в значних об'ємах, знижений вплив концентрації солей у досліджуваному вологому середовищі тощо. В більшості вимірювачів вологості використовуються поглинання або відбиття мікрохвильової енергії, а в якості випромінювачів та приймачів мікрохвиль - рупорні антени з різною площиною випромінювальної апаратури.

Безконтактність дозволяє розміщувати антени по один бік досліджуваного матеріалу, що дає важливі переваги для використання вимірювачів вологості в системах технологічного контролю. При використанні елементів розділення падаючих та відбитих хвиль (спрямованих відгалужувачів, циркуляторів тощо) доцільно використання однієї при-

ймально-передаючої антени, яка використовує нормальне падіння мікрохвильового випромінювання.

Відомий мікрохвильовий вимірювач вологості (див. Кричевский Е.С., Волченко А.Г., Галушкин С.С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов - М.: Энергоатомиздат, 1986. - С. 22-23), яке містить мікрохвильовий генератор, до виходу якого підключені послідовно з'єднані атенуатор, вентиль, хвильоводний Т-міст, в одному плечі якого включена приймально-передаюча антена, в другому плечі - навантаження, що регулюється, а до протилежного плеча підключена детекторна секція з індикатором.

Оскільки в мості відбувається сумування падаючої та відбитої хвилі, то показання індикатора залежать від фази відбитої хвилі, а, отже, і від зазору між антеною та вологим матеріалом. При технологічному контролі, наприклад, матеріалів, що рухаються, виникають великі похибки вимірювання.

Відомий також мікрохвильовий вимірювач вологості (див. Високоточні засоби вимірювання фі-

(13) A

(11) 38067

(19) UA

зичних величин із самоналагодженням і автокорекцією похибок: Навч. посібник / П.М. Таланчук, Ю.О. Скрипник, В.О. Дубровний. - К.: ІЗМН, 1996. - С. 488-489), який має мікрохвильовий генератор, послідовно з'єднаний перший вентиль, перший тривходовий циркулятор, автоматичний переривач, другий вентиль, другий тривходовий циркулятор та приймально-передаючу антену, до вільного плеча першого тривходового циркулятора підключені з'єднані послідовно атенуатор, хвильоводний трійник і детекторна секція, другий вхід хвильоводного трійника з'єднаний з вільним плечем другого тривходового циркулятора, диференційний підсилювач і стабілізоване джерело постійної напруги, з'єднане з одним із входів диференційного підсилювача, і фазочутливий випрямляч.

Крім того, вимірювач містить другий автоматичний переривач, запам'ятовуючий елемент та підсилювач постійного току, що регулюється, з'єднаний входом з виходом детекторної секції, а вихід підсилювача, що регулюється, з'єднаний через другий автоматичний переривач та запам'ятовуючий пристрій з другим входом диференційного підсилювача.

У відомому вимірювачі вихідний електричний сигнал пропорційний модулю коефіцієнта відбиття вологого матеріалу. Згідно з дослідженнями (див. Берлинер М. А. Влагомеры СВЧ // Приборы и системы управления. – 1970. - № 11. - С. 19-22), при нормальному падінні та відсутності відбиття від задньої поверхні матеріалу ($D \gg \lambda$, де D - товщина матеріалу, λ - довжина хвилі) та великому згасанню в матеріалі модуль коефіцієнта відбиття Γ зв'язаний з діелектричною проникністю вологого матеріалу залежністю:

$$|\Gamma| = \frac{\left(1 - \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}\right)^2}{\left(1 + \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}\right)^2}$$

де ε' та ε'' - дійсна та уявна складові комплексної діелектричної проникності. Діелектрична проникність вологого матеріалу пропорційна кількості води, яка знаходиться в порах матеріалу або знаходиться у зв'язаному стані. Із виразу для $|\Gamma|$ видно, що залежність модуля коефіцієнта відбиття від діелектричної проникності, а, отже, і від вологості нелінійна. Тому вихідний сигнал відомого мікрохвильового вимірювача також зв'язаний нелінійною залежністю з вологістю матеріалу, що ускладнює його використання в цифрових системах контролю та регулювання вологості та знижує точність контролю. Крім того, при зниженні інтенсивності опромінювання вологого матеріалу, що диктується санітарними нормами охорони труда, виникають складнощі у забезпеченні високої чутливості. Збільшення коефіцієнта підсилення підсилювача постійного струму, що регулюється, який включений на вихід детекторної секції, призводить до зростання похибки від неминучого дрейфу нуля підсилювача. Так, напруга від дрейфу нуля фіксується в елементі пам'яті перетворювача та спотворює роботу системи автоматичного регулювання підсилення. Підсилення постійної напруги та регулювання підсилювача постійною напругою ускладнює розв'язання ланцюгів підсилення та керування, що створює додаткові труднощі.

В основу винаходу покладена задача створення такого мікрохвильового вимірювача вологості, в якому введення нових елементів та зв'язків дозволило б лінеаризувати залежність між вихідним електричним сигналом та вологістю опромінюваного мікрохвилями матеріалу, а також підвищити чутливість і точність перетворення вологості при низьких рівнях опромінювання матеріалу, що забезпечить підвищення достовірності контролю вологості та зменшить ризик опромінення обслуговуючого персоналу мікрохвильовим випромінюванням.

Поставлена задача вирішується тим, що в мікрохвильовий вимірювач вологості, який має мікрохвильовий генератор, послідовно з'єднані перший вентиль, перший тривходовий циркулятор, автоматичний переривач, другий вентиль, другий тривходовий циркулятор та приймально-передаючу антену, до вільного плеча першого тривходового циркулятора підключені з'єднані послідовно атенуатор, хвильоводний трійник і детекторна секція, другий вхід хвильоводного трійника з'єднаний з вільним плечем другого тривходового циркулятора, диференційний підсилювач і стабілізоване джерело постійної напруги, з'єднане з одним із входів диференційного підсилювача, та фазочутливий випрямляч, згідно з винаходом, введені радіочастотний генератор, подільник частоти та амплітудний модулятор, який включений між виходом мікрохвильового генератора та входом першого вентиля, другий вхід амплітудного модулятора з'єднаний з виходом радіочастотного генератора та входом подільника частоти, вихід якого з'єднаний з другим входом автоматичного переривача та другим входом фазочутливого випрямляча, вихід якого з'єднаний з другим входом диференційного підсилювача, послідовно з'єднані керований резонансний підсилювач, амплітудний детектор, фільтр верхніх частот і підсилювач змінної напруги, вихід якого з'єднаний з входом фазочутливого випрямляча, інтегратор, включений між виходом диференційного підсилювача та другим входом керованого резонансного підсилювача, перший вхід якого підключений до виходу детекторної секції, а також послідовно з'єднані фільтр нижніх частот і аналого-цифровий перетворювач, при цьому вхід фільтра нижніх частот підключений до виходу амплітудного детектора, а вихід аналого-цифрового перетворювача є виходом мікрохвильового вимірювача вологості.

Введення в схему мікрохвильового вимірювача вологості амплітудного модулятора з радіочастотним генератором та керованого резонансного підсилювача, підключеного до виходу детекторної секції, дозволяє значно підвищити чутливість до вологості при низьких рівнях опромінення вологого матеріалу. Введення амплітудного детектора, вихід якого з'єднаний через введені фільтр верхніх частот та підсилювач змінної напруги з входом фазочутливого випрямляча, вихід якого з'єднаний з одним із входів диференційного підсилювача, вихід якого через введений інтегратор з'єднаний з другим входом керованого резонансного підсилювача, забезпечує виконання операції ділення суми амплітуд відеоімпульсів, пропорційних потужності падаючої на вологий матеріал мікрохвилі та відбитої від нього хвилі, на різницю амплітуд цих відеоімпульсів. Підключення послідовно з'єднаних фі-

льтра нижніх частот та аналого-цифрового перетворювача до виходу амплітудного детектора забезпечує формування вихідного сигналу, пропорційного діелектричній проникності вологого матеріалу, а тому і вологості опромінюваного матеріалу. Вказані схемно-технічні відмінності забезпечують підвищення достовірності контролю вологості та зменшення ризику опромінення обслуговуючого персоналу мікрохвильовим випромінюванням.

На фігурі представлена функціональна схема мікрохвильового вимірювача вологості, який містить мікрохвильовий генератор 1, до виходу якого підключені послідовно з'єднані амплітудний модулятор 2, перший вентиль 3, перший тривходовий циркулятор 4, автоматичний переривач 5, другий вентиль 6, другий тривходовий циркулятор 7 та приймально-передаюча антена 8. До вільного плеча першого циркулятора 4 підключені з'єднані послідовно атенуювач 9, хвильоводний трійник 10 та детекторна секція 11, другий вхід хвильоводного трійника 10 з'єднаний з вільним плечем другого циркулятора 7. До виходу детекторної секції 11 підключені з'єднані послідовно керований резонансний підсилювач 12, амплітудний детектор 13, фільтр 14 верхніх частот, підсилювач 15 змінної напруги та фазочутливий випрямляч 16, вихід якого з'єднаний з одним входом диференційного підсилювача 17, другий вхід якого з'єднаний з виходом стабілізованого джерела 18 постійної напруги. Вихід диференційного підсилювача 17 з'єднаний через інтегратор 19 з другим входом керованого резонансного підсилювача 12. До виходу амплітудного детектора 13 також підключені послідовно з'єднані фільтр 20 нижніх частот та аналого-цифровий перетворювач 21. Радіочастотний генератор 22 з'єднаний з входом подільника 23 частоти та другим входом амплітудного модулятора 2. Позицією 24 позначений опромінюваний мікрохвилями вологий матеріал. Мікрохвильовий вимірювач вологості працює таким чином:

Мікрохвильові коливання генератора 1 піддаються в модуляторі 2 амплітудній модуляції радіочастотними коливаннями генератора 22 частоти ω . Модульовані мікрохвильові коливання проходять через вентиль 3 і циркулятор 4 та надходять на автоматичний переривач 5, який керується низькочастотною напругою частоти $\Omega \ll \omega$ з виходу подільника 23 частоти. Автоматичний переривач 5 виконаний на р-і-п-діодах і працює на принципі відбиття, коли на його діоди надходить запираюча напруга. Коли діоди переривача відкриті, мікрохвильові коливання проходять через переривач 5, вентиль 6 та циркулятор 7 і поступають на антену 8. Випромінені коливання частково поглинаються вологим матеріалом 24, а частково відбиваються від вологого матеріалу. Модуль коефіцієнта відбиття при нормальному падінні та довжині хвилі λ , яка набагато менша за товщину матеріалу D ($\lambda \ll D$), визначається виразом

$$|\Gamma| = \frac{\left(1 - \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}\right)^2}{\left(1 + \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}\right)^2} \quad (1)$$

де ε' та ε'' - дійсна та уявна складові комплексної діелектричної проникності вологого матеріалу.

Відбиті коливання приймаються антеною 8 і через вільне плече циркулятора 7 та хвильоводний трійник 10 поступають на детекторну секцію 11. Відбиті коливання, що пройшли через циркулятор 7, поглинаються у вентилі 6. Оскільки автоматичний переривач 5 працює з низькою частотою, то відбиті коливання мають вигляд пакетів мікрохвильових коливань, модульованих з частотою ω тривалістю $\Delta t_1 = \pi/\Omega$.

В результаті квадратичного детектування пакетів коливань на виході детекторної секції 11 утворюються радіоімпульси частоти модуляції ω , тривалістю Δt_1 з амплітудою

$$U_1 = m^2 k_1^4 k_2^2 k_3^2 S_1 |\Gamma|^2 P_1 \quad (2)$$

де m - коефіцієнт глибини амплітудної модуляції в модуляторі 2;

k_1 - коефіцієнт передачі приймально-передаючої антени 8;

k_2 - коефіцієнт передачі циркулятора 7;

k_3 - коефіцієнт передачі хвильоводного трійника 10;

S_1 - чутливість детекторної секції 11;

$|\Gamma|$ - модуль коефіцієнта відбиття вологого матеріалу 24;

P_1 - потужність мікрохвильових коливань генератора 1.

Коли діоди автоматичного переривача 5 закриті, мікрохвильові коливання генератора 1 відбиваються від переривача і через вільне плече циркулятора 4 поступають на атенуювач 9, в якому ослаблюються. Відбиті коливання, що пройшли через циркулятор 4, поглинаються у вентилі 3. Пакети ослаблених мікрохвильових коливань тривалістю Δt_2 з виходу атенуювача 9 проходять через хвильоводний трійник 10 і також поступають на детекторну секцію 11. На виході детекторної секції утворюються радіоімпульси частоти модуляції ω тривалістю $\Delta t_2 = \Delta t_1$ та амплітудою

$$U_2 = m^2 k_3^2 k_4^2 k_5^2 S_1 P_1 \quad (3)$$

де k_4 - коефіцієнт передачі циркулятора 4;

k_5 - коефіцієнт передачі атенуювача 9.

Радіоімпульси з амплітудами U_1 і U_2 підсилюються керованим резонансним підсилювачем 12, який настроєний на частоту модуляції ω . Підсилені радіоімпульси по чергові детектуються амплітудним детектором 13. В результаті детектування утворюються послідовні відеоімпульси з амплітудами:

$$U_3 = m^2 k_1^4 k_2^2 k_3^2 S_1 k_6 S_2 |\Gamma|^2 \cdot P_1 \quad (4)$$

$$U_4 = m^2 k_3^2 k_4^2 k_5^2 S_1 k_6 S_2 P_1 \quad (5)$$

де k_6 - коефіцієнт підсилення резонансного підсилювача 12;

S_2 - чутливість амплітудного детектора 13.

Фільтром 14 верхніх частот із послідовності відео імпульсів з амплітудами (4) і (5) виділяється змінна складова напруги

$$U_5 = k_7 \frac{U_4 - U_3}{2} \quad (6)$$

де k_7 - коефіцієнт передачі фільтра 14.

Оскільки в схемі використовуються однопісні циркулятори 4 і 7, то можна вважати, що коефіцієнти їх передач рівні ($k_2 = k_4$). Тоді, підставляючи у вираз (6) значення напруг (4) і (5), отримаємо

$$U_5 = 0,5m^2k_2^2k_3^2S_1k_6k_7S_2(k_5^2 - k_1^4|\Gamma|^2) \cdot P_1 \quad (7)$$

Змінна напруга з амплітудою U_5 підсилюється підсилювачем 15 змінної напруги та випрямляється фазочутливим випрямлячем 16. Випрямлена напруга поступає на один вхід диференційного підсилювача 17, на другий вхід якого прикладена стабілізована постійна напруга $U_6 = \text{const}$ від джерела 18. На виході диференційного підсилювача формується підсилена різницєва напруга

$$U_7 = k_9 [U_6 - 0,5m^2k_2^2k_3^2S_1k_6k_7S_2(k_5^2 - k_1^4|\Gamma|^2)P_1] \quad (8)$$

де k_8 - коефіцієнт підсилення підсилювача 15 і змінної напруги,

k_9 - коефіцієнт підсилення диференційного підсилювача 17.

Різницєва напруга U_7 заряджає інтегратор 19, вихідна напруга якого керує коефіцієнтом підсилення резонансного підсилювача 12. Процес автоматичного регулювання коефіцієнта підсилення k_6 підсилювача 12 продовжується до тих пір, поки вхідні напруги диференційного підсилювача 17 не зрівняються ($U_5 = U_6$).

При цьому маємо

$$U_6 = 0,5m^2k_2^2k_3^2S_1k_6k_7S_2(k_5^2 - k_1^4|\Gamma|^2)P_1 \quad (9)$$

З рівняння (9) визначимо значення коефіцієнта підсилення резонансного підсилювача 12, що встановилося:

$$k_6 = \frac{2U_6}{m^2k_2^2k_3^2S_1S_2k_7k_8(k_5^2 - k_1^4|\Gamma|^2)P_1} \quad (10)$$

Фільтром 20 нижніх частот із послідовності відео імпульсів з амплітудами P_3 та U_4 виділяється постійна складова напруги

$$U_8 = k_{10} \frac{U_3 + U_4}{2} \quad (11)$$

де k_{10} - коефіцієнт передачі фільтра 20. З урахуванням значень напруг P_3 та U_4 із виразів (4) і (5) отримаємо

$$U_8 = 0,5m^2k_2^2k_3^2S_1k_6k_{10}S_2(k_5^2 - k_1^4|\Gamma|^2)P_1 \quad (12)$$

Якщо підставити у вираз (12) значення коефіцієнта підсилення k_6 резонансного підсилювача, то напруга приймає вигляд

$$U_8 = \frac{k_{10}}{k_7k_8} \frac{k_5^2 + k_1^4|\Gamma|^2}{k_5^2 - k_1^4|\Gamma|^2} U_6 \quad (13)$$

Калібровку мікрохвильового перетворювача вологості проводять при $|\Gamma|=1$, що забезпечується накладанням металевої пластини на рупор антени 8. При цьому коефіцієнт передачі атенюатора 9 регулюють до зникання змінної напруги (7). Із умови $U_5=0$ маємо співвідношення

$$k_5 = k_1^2 \quad (14)$$

Коефіцієнт підсилення k_8 підсилювача 15 змінної напруги встановлюють із умови

$$k_8 = \frac{k_{10}}{k_7} \quad (15)$$

Після проведення калібровки з урахуванням співвідношень (14) і (15) отримаємо значення постійної напруги

$$U_8 = \frac{1+|\Gamma|^2}{1-|\Gamma|^2} U_6 \quad (16)$$

Якщо підставити у вираз (16) значення модуля коефіцієнта відбиття із (1), то напруга

$$U_8 = \frac{\left(1 + \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}\right)^4 + \left(1 - \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}\right)^4}{\left(1 + \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}\right)^4 - \left(1 - \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}\right)^4} U_6 \quad (17)$$

Після математичних перетворень отримаємо

$$U_8 = \frac{1 + 6(\varepsilon' - j\varepsilon'') + (\varepsilon' - j\varepsilon'')^2}{4\left(\sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''} + \sqrt{(\varepsilon' - j\varepsilon'')^3}\right)} U_6 \quad (18)$$

У вологому матеріалі справедливо співвідношення:

$$1 \ll \varepsilon' - j\varepsilon'' < (\varepsilon' - j\varepsilon'')^2 \quad (19)$$

Дослідження показали, що вихідна напруга (18) при умові (19) пропорційна комплексній діелектричній проникності, тобто вологості матеріалу

$$U_8 \approx (\varepsilon' - j\varepsilon'') U_6 = S_0 W \quad (20)$$

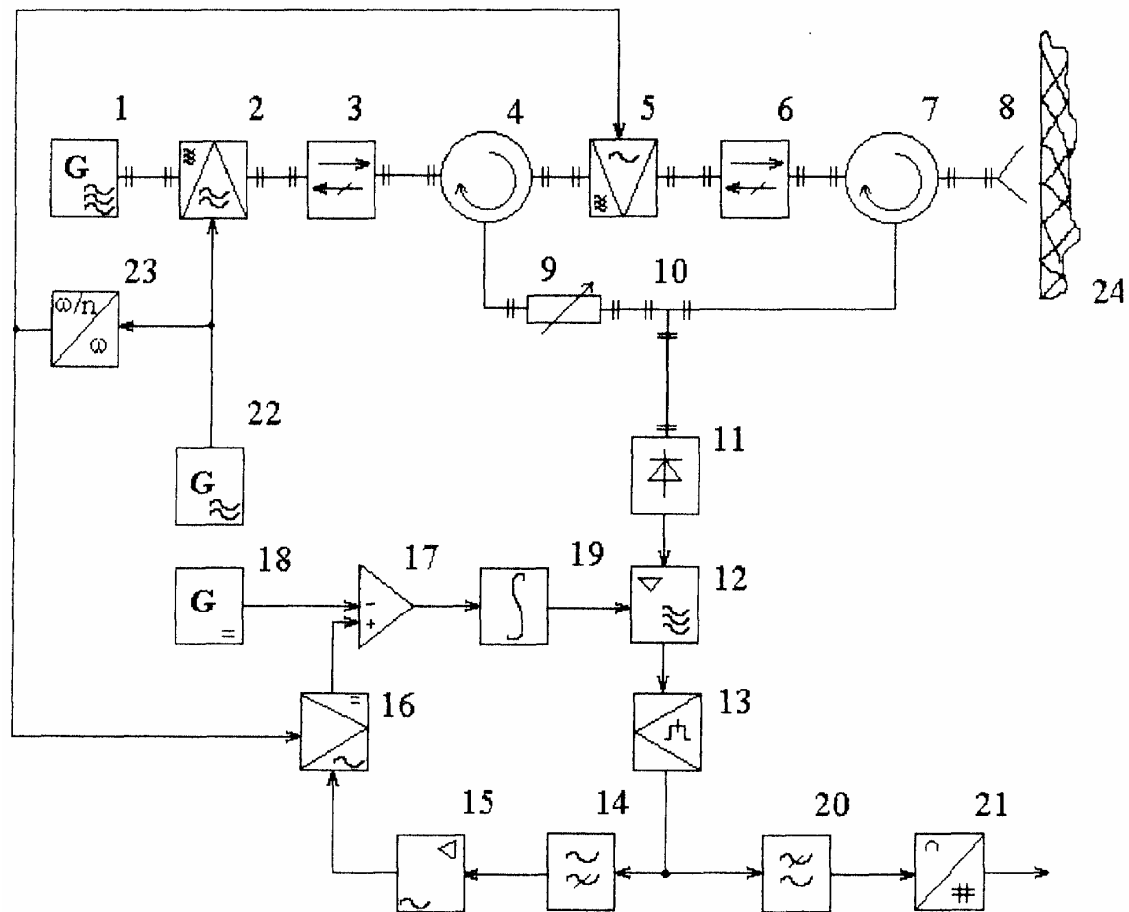
де S_0 - результуюча крутість перетворення вологості в електричну напругу,

W - вологість матеріалу.

Із виразів (16) і (20) випливає, що результат перетворення вологості в напругу не залежить від непостійності потужності мікрохвильового випромінювання (P_1), нестабільності параметрів мікрохвильових елементів (k_1, k_2, k_3 і S_1) та параметрів високочастотного тракту (k_6, S_2), а також частотного розладнання резонансного підсилювача 12. Завдяки вузькополосному підсиленню радіоімпульсів забезпечується висока чутливість до вологості при низьких рівнях мікрохвильового опромінення матеріалу. Виконання керованого підсилювача на основі високочастотного резонансного підсилювача забезпечує добре розв'язання ланцюга підсилення та ланцюга керування коефіцієнтом підсилення, що підвищує захищеність від перешкод перетворювача та достовірність контролю вологості.

Постійна напруга U_8 з виходу фільтра 20 нижніх частот поступає на аналого-цифровий перетворювач 21, де перетворюється в цифровий код, пропорційний вологості. Вихід аналого-цифрового перетворювача 21 є електричним виходом мікрохвильового перетворювача вологості.

Дослідження показали, що використання мікрохвильового випромінювання міліметрового діапазону довжин хвиль (30-300 ГГц) дозволяє створити лінійний перетворювач вологості капілярно-пористих матеріалів (натуральна та штучна шкіра, текстиль, целюлоза, папір, картон тощо), в сантиметровому діапазоні довжин хвиль (3-30 ГГц) забезпечується лінійне перетворення вологості шкіри, бавовни, вовни, маси зерна та іншої сільгосппродукції в електричний цифровий сигнал.



Фіг.

ДП "Український інститут промислової власності" (Укрпатент)
 Україна, 01133, Київ-133, бульв. Лесі Українки, 26
 (044) 295-81-42, 295-61-97

Підписано до друку _____ 2001 р. Формат 60x84 1/8.
 Обсяг _____ обл.-вид. арк. Тираж 50 прим. Зам. _____

УкрІНТЕІ, 03680, Київ-39 МСП, вул. Горького, 180.
 (044) 268-25-22