

Й.Й. БІЛИНСЬКИЙ, О.С. ГОРОДЕЦЬКА, Д.В. НОВИЦЬКИЙ
Вінницький національний технічний університет

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ХВИЛЕВОДНОГО НВЧ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

В статті розроблено математичну модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу шляхом використання біжучої хвилі на основі хвилеводного методу, запропоновано структурну схему вимірювального перетворювача вологості природного газу, описано принцип його роботи.

Ключові слова: вологість, природний газ, надвисокочастотний хвилеводний метод, біжуча хвиля.

Y.Y. BILYNSKY, O.S. HORODETSKA, D.V. NOVYTSKYI
Vinnytsia National Technical University

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE WAVEGUIDE MICROWAVE MEASURING CONVERSION THE HUMIDITY OF NATURAL GAS

The purpose of the article is to improve the accuracy of measuring the conversion of the humidity of natural gas by using the microwave waveguide method. In the article a reasonable analysis of the choice of the waveguide microwave method of measuring the humidity of natural gas has been made. In contrast to the known methods, the use of a traveling wave in a waveguide has been proposed, and changes in the dielectric properties of gases when they interact with the microwave waves are estimated. A mathematical model for the microwave measuring conversion of the humidity of natural gas has been proposed, the meaning of which is to absorb the microwave signal and, consequently, measure the power of this signal at the output of the waveguide when the humidity of the gas changes by using a traveling wave. In the article also the dependence of the power of a traveling wave on the absolute humidity of water vapour at various values of the passage of the microwave signal in a humid environment, taking into account temperature and pressure has been investigated. A structural scheme of a microwave measuring transducer of humidity of natural gas has been proposed, the principle of its operation has been described. The research results suggest that it is promising for practical application of measuring the moisture of natural gas devices using tools based on the microwave traveling wave method.

Keywords: humidity, natural gas, microwave waveguide method, traveling wave.

Вступ

Однією з найважливіших задач під час транспортування природного газу є оцінка його якості, під якою розуміють відповідність його складу певним значенням його основних характеристик, таких як теплотворна здатність, вміст вологи та наявність корозійно-активних компонентів (сірководень, вуглекислий газ тощо). Найбільш вагомими є домішки води, присутність якої в газі небажана, оскільки при транспортуванні газу можуть спостерігатися випадки корозії трубопроводів і арматури, а також утворення гідратів (продуктів приєднання води до різних речовин) та конденсату. Умови транспортування не потребують повного видалення вологи з природного газу, а вимагають лише підтримки необхідної температури точки роси вологи та вуглеводнів, що не переводить газ, при зниженні його температури, з ненасиченого стану в насичений, при якому можливе виділення конденсованої фази з його складу [1, 2].

Кількісно вологовміст у газі може характеризуватися різними фізичними величинами, серед яких найбільш широко розповсюдженими є абсолютна вологість, молярна (об'ємна) частка вологи, об'ємний вологовміст, температура точки роси, відносна вологість.

На сьогодні чинним в Україні документом, який містить санітарно-гігієнічні вимоги та вимоги безпеки, є міждержавний ГОСТ [3]. Особливе місце в нормативному забезпеченні займають науково обґрунтовані норми для значень якісних показників газу. В технічних умовах на газ, що подається з родовищ, газопереробних заводів та підземних сховищ України до магістральних газопроводів ТУ У 11.1-20077720-001:2010 встановлені такі вимоги щодо вологості газу: для об'єктів, що подають газ до газопроводів-відводів з робочим тиском понад 2,45 МПа (відводи магістральних газопроводів I класу) температура точки роси має становити:

- не вище мінус 5 ° (при 3,92 МПа) з 1 жовтня по 30 квітня (зимовий період);
 - не вище мінус 3 °С (при 3,92 МПа) з 1 травня по 30 жовтня (літній період);
- для об'єктів, що подають газ до магістральних газопроводів II класу:
- мінус 5 °С (при 2,45 МПа) з 1 жовтня по 30 квітня;
 - 0 °С (при 2,45 МПа) з 1 травня по 31 травня і з 1 вересня по 31 жовтня);
 - плюс 5 °С (при 2,45 МПа) з 1 червня по 31 серпня.

Існує багато методів і засобів визначення вологості. Найбільш розповсюдженим методом є конденсаційний, який має ряд обмежень. А саме метод застосовується для визначення температури точки роси вологи в газах, що не містять крапельної рідини і точка роси вуглеводнів яких не перевищує точки роси вологи більше, ніж на 5°C. Крім того, температура на пробовідбірній лінії повинна бути не менше, ніж на 3°C вище ймовірної (очікуваної) температури точки роси газу. При недотриманні вище вказаних вимог суттєво зростає похибка вимірювання. Дані обмеження відсутні в надвисокочастотному методі вимірювання вологості природного газу.

Метою роботи є підвищення точності вимірювального перетворення шляхом використання НВЧ

хвилеводного методу біжучої хвилі.

Матеріали та результати досліджень. Вимірювання вологості газів на НВЧ є різновидом діелекметричного методу, в якому зміна діелектричних властивостей газів оцінюється за їх взаємодією з радіохвилями дециметрового, сантиметрового та міліметрового діапазонів. Згідно з прийнятою класифікацією методи НВЧ вологометрії поділяються на оптичні, резонансні, хвилеводні, биття, зондові тощо [2, 4, 5].

Оптичні методи чи методи вільного простору, в свою чергу, поділяються на такі, що використовують хвилі проходження та відбиваючі хвилі. В цих модифікаціях вимірюванню характеристикою може бути затухання, зміна амплітуди чи фази хвилі [1].

Для резонансних методів характерне використання двох резонаторів: вимірювального та опорного. Для отримання точних результатів необхідно, щоб частота опорного резонатора залишалась незмінною на протязі всього часу, необхідного для вимірювань. При вимірюванні діелектричної проникності вологий газ продувається через резонатор і вимірюється відносний зсув частоти резонатора, заповненого паром, порівняно з частотою резонатора, заповненого сухим газом. На основі вимірювань, отриманих для певного вмісту вологи в газі, можуть бути проведені розрахунки діелектричної проникності газу при іншому відсотковому вмісті вологи. Ці розрахунки проводяться за допомогою ентропійних діаграм, що ускладнює обробку результатів вимірювання і є суттєвим недоліком [4].

В методі биття порівнюються резонансні частоти двох генераторів. Перший генератор є опорним і працює на фіксованій частоті, а в коливальний контур другого генератора включається еталонний змінний конденсатор. Коливання від двох генераторів подаються на змішувач, що дозволяє отримати різницеву частоту (биття), яка реєструється вихідним індикатором. Змінюючи частоту генератора, домагаються рівності частот (нульові биття). Після отримання нульового биття паралельно до еталонного конденсатора підключається вимірювальний конденсатор з досліджуваною речовиною. Діелектрична проникність визначається через різницю значень ємності еталонного конденсатора до підключення вимірювального конденсатора, його ємності після підключення і ємності вимірювального конденсатора. Недоліком такого методу є складне схемотехнічне рішення [5].

Хвилеводний метод полягає в тому, що в хвилеводній лінії передачі за допомогою генератора НВЧ на довжині хвилі генератора, збуджують основну хвилю і встановлюють в лінії передачі режим стоячих хвиль. Перед вимірюванням хвилеводна комірка відкачується і на вимірювальній лінії знаходиться положення вузла стоячої хвилі. Потім в хвилеводну комірку вводять досліджуваний газ, що викликає зміщення мінімуму стоячої хвилі. Зміщення вузла стоячої хвилі дозволяє визначити діелектричну проникність досліджуваного газу за відомою довжиною хвилі в хвилеводі та довжиною хвилі у вільному просторі. Недоліком такого методу є великі розміри хвилеводної комірки [2, 5].

В роботі запропоновано математична модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу, суть якого полягає у поглинанні НВЧ сигналу, а отже вимірюванні потужності даного сигналу на виході хвилеводу при зміні вологості газу шляхом використання біжучої хвилі.

Поведінка діелектрика в синусоїдальному електромагнітному полі характеризується макроскопічними величинами комплексних діелектричної ϵ^* і магнітної μ^* проникностями. У вологих матеріалів, що не містять ферромагнетиків, величина $\mu^* \approx \mu_0$ (магнітної проникності пустоти) і їх електричні властивості в слабких змінних електричних полях можна описати двома параметрами, пов'язаними з ϵ^* такими, як дійсна ϵ' і уявна ϵ'' складові комплексної діелектричної проникності через $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$.

Сучасна фізика діелектриків пов'язує залежність ϵ і $\text{tg}\delta$ матеріалів від їх властивостей з основними процесом, що відбувається в будь-якому реальному діелектрику під впливом електричного поля, – поляризацією частинок діелектрика.

В гетерогенних системах поляризація має неоднаковий характер для різних фаз і для всієї системи в цілому. На характеристики системи здійснює також вплив подвійний електричний шар, обумовлений наявністю заряду на поверхні поділу між фазами, що мають різні електричні властивості (ϵ і σ).

Залежність між цими величинами має вигляд [2]:

$$\epsilon'' = \epsilon'; \quad \epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega}; \quad \text{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}; \quad \epsilon^* = \epsilon(1 - j\text{tg}\delta) \quad (1)$$

де ω – кутова частота;

$\text{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат.

За Дебаєм частотна залежність діелектричної проникності при релаксаційному поглинанні описується рівняннями [2]:

$$\epsilon^* - \epsilon_\infty = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (2)$$

Звідки

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega^2\tau^2}, \quad (3)$$

і

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) = \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (4)$$

З (4) можна визначити максимальне значення ε'' :

$$\varepsilon''_{\text{макс}} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{2}. \quad (5)$$

Вихідною величиною вимірювального перетворення, що базується на проходженні електромагнітної хвилі по хвилеводу у вільному середовищі, слугує ослаблення.

Потужність випромінювання затухає в результаті проходження біжучої хвилі по хвилеводу за законом [2, 5]:

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha l}, \quad (6)$$

де P_0 – вхідна потужність, що поширюється хвилеводом;
 l – довжина проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі;
 α – загальний коефіцієнт поглинання, що дорівнює

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (7)$$

де α_1 – коефіцієнт поглинання для водяної пари;
 α_2 – коефіцієнт поглинання для природного газу.

Оскільки вимірювання діелектричної проникності газів повинно забезпечувати значення шостого знаку після коми, що відповідає точності порядку $10^{-4}\%$ для величини ε' або 1-2% для величини $\varepsilon' - 1$, то величина $\varepsilon' - 1$ вимірюється з похибкою, яку можна експериментально реалізувати. Залежність діелектричної проникності газів від температури та тиску визначається зміною числа молекул в одиниці об'єму газу. При цьому значення діелектричної проникності досліджуваного газу при тиску P і температурі T (в градусах шкали Кельвіна) може бути перераховано до значення ε'_0 при тиску 760 мм рт. ст. і температурі 273,2°К за формулою [5, 6]

$$\varepsilon'_0 - 1 = (\varepsilon' - 1) \frac{760}{p} \frac{T}{273,2} \quad (8)$$

Коефіцієнт поглинання для водяної пари згідно з [2] визначається

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} - \varepsilon')} \quad (9)$$

З урахуванням $E'_1 = \varepsilon'_0 - 1$ та $E''_1 = \varepsilon''_0 - 1$, отримаємо

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{E_1'^2 + E_1''^2} - E_1')}. \quad (10)$$

Діелектрична проникність пропорційна густині водяної пари [7, 8]

$$\frac{\rho_{\varepsilon}}{\rho_{\varepsilon,n}} = \frac{\varepsilon_{\varepsilon}}{\varepsilon_0}, \quad (11)$$

де ρ_{ε} – густина води;
 $\rho_{\varepsilon,n}$ – абсолютна вологість водяної пари;
 $\varepsilon_{\varepsilon}$, ε_0 – діелектрична проникність води та водяної пари.

З (11) випливає, що

$$\varepsilon_0 = \frac{\rho_{\varepsilon,n} \varepsilon_{\varepsilon}}{\rho_{\varepsilon}}. \quad (12)$$

Тоді

$$E'_1 = \frac{\rho_{\varepsilon,n}}{\rho_{\varepsilon}} (\varepsilon'_\varepsilon - 1), \quad E''_1 = \frac{\rho_{\varepsilon,n}}{\rho_{\varepsilon}} (\varepsilon''_\varepsilon - 1). \quad (13)$$

З урахуванням (8), (9), (13) отримаємо

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot 273,2}{760 \cdot T} \cdot \frac{\rho_{\varepsilon,n}}{\rho_{\varepsilon}} (\sqrt{E_1'^2 + E_1''^2} - E_1')}. \quad (13)$$

Аналогічно для газу:

$$\alpha_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot 273,2}{760 \cdot T} \cdot (\sqrt{E_2'^2 + E_2''^2} - E_2'')} \quad (14)$$

Залежність відношення вхідної до вихідної потужності випромінювання від абсолютної вологості водяної пари наведена на рис. 1 при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі: $l_1=0,12$ м, $l_2=0,15$ м, $l_3=0,21$ м при $p=1$ атм, $T=0$ °С. Як видно з характеристик, із зростанням абсолютної вологості водяної пари потужність випромінювання спадає за експоненційним законом. При цьому із збільшенням довжини проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі потужність випромінювання зменшується.

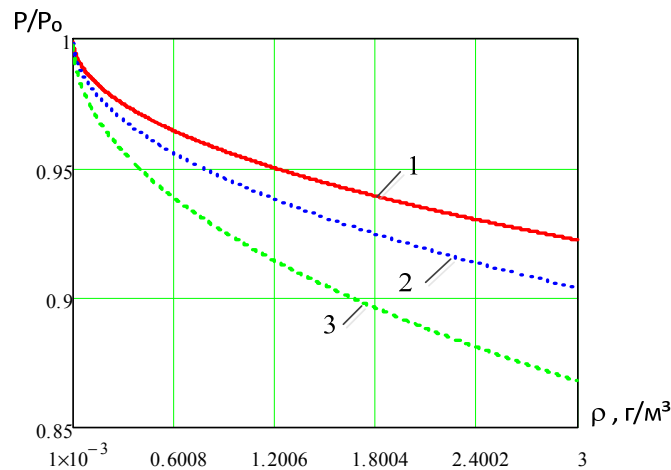


Рис. 1. Залежність відношення вхідної до вихідної потужності випромінювання від абсолютної вологості водяної пари при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу: 1 – $l_1=0,12$ м, 2 – $l_2=0,15$ м, 3 – $l_3=0,21$ м

На рис. 2 наведена чутливість вимірювального перетворення при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі.

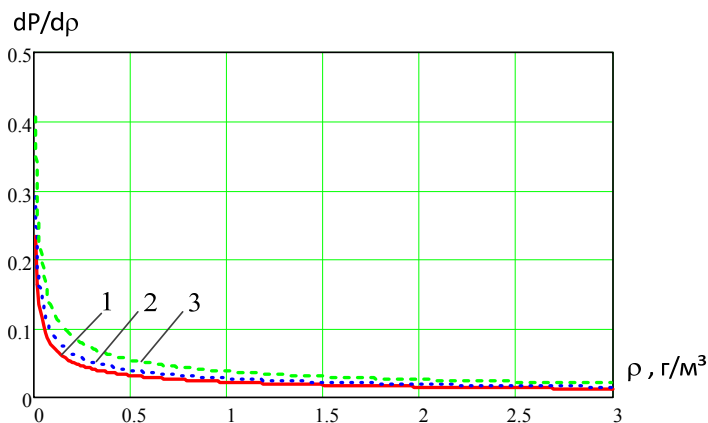


Рис. 2. Чутливість вимірювального перетворення при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу: 1 – $l_1=0,12$ м, 2 – $l_2=0,15$ м, 3 – $l_3=0,21$ м

Як видно з графіка, поріг чутливості вимірювального перетворення вологості збільшується при збільшенні відстані проходження НВЧ сигналу. Це означає, що при розробці вимірювального перетворювача можна розрахувати необхідну довжину хвильоводного тракту, яка задовольняє задану чутливість при відповідному значенні довжини хвилі електромагнітного випромінювання.

На рис. 3 наведена залежність затухання НВЧ сигналу в результаті проходження через вологий газ при різних значеннях температури: $T_1= -10$ °С, $T_2= 0$ °С, $T_3= +5$ °С, а на рис. 4 – при різних значеннях тиску: $p_1=1$ атм, $p_2=1,5$ атм, $p_3=2$ атм.

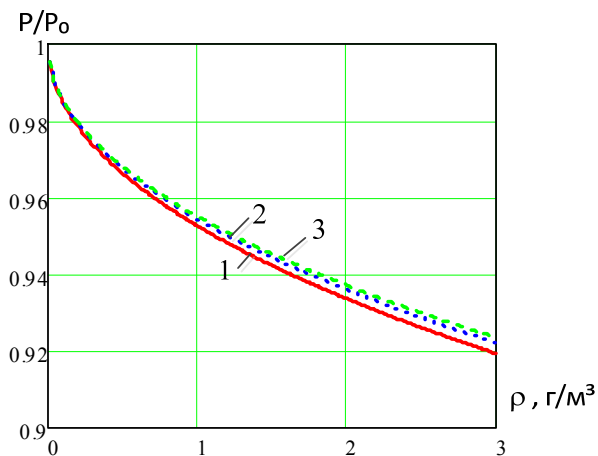


Рис. 3. Залежність потужності випромінювання від вологості при різних значеннях температури: 1 – $T_1 = -10\text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $T_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}$, 3 – $T_3 = +5\text{ }^\circ\text{C}$

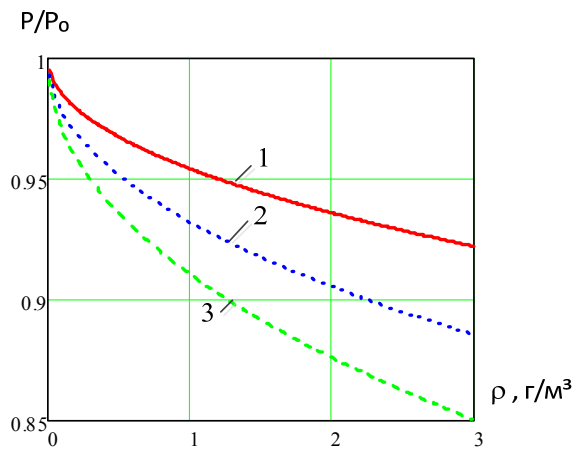


Рис. 4. Залежність потужності випромінювання від вологості при різних значеннях тиску: 1 – $p_1 = 1\text{ атм}$, 2 – $p_2 = 1,5\text{ атм}$, 3 – $p_3 = 2\text{ атм}$

Як видно з графіків максимальна відносна похибка, що вноситься температурою, становить 0,13% при зміні на один градус, а тиском – 0,75% на одну атмосферу. Похибка, що вноситься температурою і тиском, є незначною. Це дає змогу зробити висновок про перспективність використання НВЧ перетворювачів вимірювання вологості природного газу

Таким чином проведені дослідження дозволяють розробити математичну модель вимірювального перетворювача природного газу на основі НВЧ методу біжучої хвилі і, відповідно, вимірювальний перетворювач, структурна схема якого наведена на рис. 5.

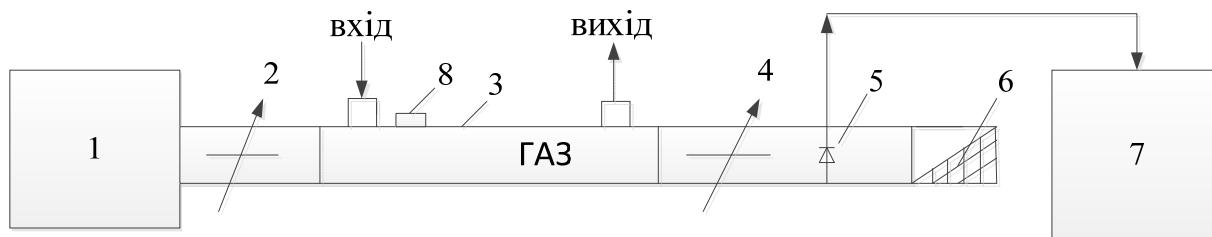


Рис. 5. Структурна схема вимірювального перетворювача вологості газу:
1 – НВЧ генератор, 2 і 4 – атенюатори, 3 – вимірювальна кювета, 5 – діодна секція, 6 – узгоджене навантаження, 7 – індикаторний пристрій, 8 – сенсори температури та тиску

Вимірювальний перетворювач містить НВЧ генератор 1, атенюатори 2 і 4, вимірювальну кювету 3, діодну секцію 5, узгоджене навантаження 6, індикатор 7 та сенсори температури та тиску 8.

НВЧ генератор 1 випромінює електромагнітну енергію з довжиною хвилі $\lambda = 3\text{ см}$. Ця електромагнітна енергія потрапляє на атенюатор 2, з якого надходить на вимірювальну кювету 3 [9]. Через вхідний штуцер (вхід) в вимірювальну кювету 3, що представляє собою стандартний 3 см хвилевід, закачується досліджуваний газ. Електромагнітна енергія проходить через шар досліджуваного газу в хвилеводі, послаблюється в залежності від кількості води, що міститься в природному газі, і надходить на атенюатор 4 [10]. З атенюатора 4 вона потрапляє на високочастотний діод 5, який перетворює електромагнітну енергію в постійний струм, що змінюється в залежності від величини діелектричної проникності досліджуваного газу в даний період часу. Проходячи діодну секцію 5, електромагнітна хвиля поглинається узгодженим навантаженням 6. Високочастотний діод 5 випрямляє високочастотний струм, що надходить на нього, величина якого фіксується індикаторним пристроєм 7. Виходячи з опису видно, що електромагнітна хвиля, що проходить вимірювальну кювету 3, має характер хвилі, що біжить. Наявність сенсорів температури та тиску 8 дозволяє врахувати відповідний тиск і температуру при вимірювальному перетворенні.

За допомогою цього пристрою можна вимірювати як ослаблення амплітуди, так і зміну фази електромагнітного сигналу, що проходить через досліджуваний газ.

Висновки. Запропоновано математичну модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу, суть якого полягає у вимірюванні потужності НВЧ сигналу біжучої хвилі на виході хвилеводу, що відповідає вологості газу шляхом використання біжучої хвилі. Проведено дослідження залежності потужності біжучої хвилі від абсолютної вологості водяної пари при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу у вологому середовищі з урахуванням температури та тиску. Встановлено, що зі зростанням абсолютної вологості водяної пари потужність випромінювання спадає за експоненціальним законом. Довжина електромагнітної хвилі, а також відстань проходження НВЧ сигналу визначає поріг чутливості вимірювального перетворення вологості. Крім цього встановлено, що значення похибки, яка

вноситься впливом температури та тиску, є незначною. Запропоновано структурну схему НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу, описано принцип його роботи.

Результати досліджень дають можливість стверджувати про перспективність для практичного застосування вимірювання вологості природного газу засобів, основаних на НВЧ методі біжучої хвилі.

Література

1. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
2. Берлинер М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
3. ГОСТ 5542-87 Газ горючий природный для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. Госстандарт России (01.01.1988). М. : ИПК Издательство стандартов, 2000 ; 2004.
4. Korotcenkov G. Handbook of Humidity Measurement, Volume 1: Spectroscopic Methods of Humidity Measurement / G. Korotcenkov. – CRC Press Published March 26, (2018) Reference - 372 P.
5. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / Брандт А.А. – М. : Физматгиз, 1963. – 404 с.
6. Кричевский Е. С. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, М. В. Венедиктов. – М.: Энергия, 1980. – 240 с.
7. Moisture Measurement in Natural Gas Rolf Kolass. Michell Instruments GmbH, Friedrichsdorf, Germanu, Cris Parker, Michell Instruments Ltd, Cambridge, UK., 2016. [Online]. Available: <http://www.ebookpp.com/mo/mositure-doc.html>.
8. Бакуменко О. І. Нові розробки у галузі визначення температури точки роси природного газу / О. І. Бакуменко // Трубопровідний транспорт, № 4 (94), 2015. –с. 16-26.
9. Yosyp Y. Bilinsky, Yosip R. Saldan, Kostyantyn V. Ogorodnik, Alexander A. Lazarev, Oksana S. Horodetska, Tomasz Zyska, Aisha Mussabekova, "New ultrasound approaches to measuring material parameters", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085F (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501637.
10. Білінський Й.Й. Аналізатор вологості природного газу та оцінка вірогідності вимірювального контролю вологості/ Й.Й. Білінський, О.С. Городецька, В.В. Онушко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – №3. – С. 28-31.

References

1. Muhitdinov M. Opticheskie metody i ustrojstva kontrolja vlazhnosti / M. Muhitdinov, Je. S. Musaev. M. : Jenergoatomizdat, 1986. 96 s.
2. Berliner M. A. Izmerenija vlazhnosti / M. A. Berliner. M. : Jenergija, 1973. 400 s.
3. GOST 5542-87 Gaz gorjuchij prirodnyj dlja promyshlennogo i kommunal'no-bytovogo naznachenija. Tehnicheskie uslovija. Gosstandart Rossii (01.01.1988). M. : IPK Izdatel'stvo standartov, 2000 ; 2004.
4. Korotcenkov G. Handbook of Humidity Measurement, Volume 1: Spectroscopic Methods of Humidity Measurement / G. Korotcenkov. CRC Press Published March 26, (2018) Reference - 372 P.
5. Brandt A. A. Issledovanie dijelektrikov na sverhvysokih chastotah / Brandt A.A. M. : Fizmatgiz, 1963. 404 s.
6. Krichevskij E. S. Teorija i praktika jekspressnogo kontrolja vlazhnosti tverdyh i zhidkih materialov / E. S. Krichevskij, V.K. Benzar', M. V. Venediktov. M.: Jenergija, 1980. 240 s.
7. Moisture Measurement in Natural Gas Rolf Kolass. Michell Instruments GmbH, Friedrichsdorf, Germanu, Cris Parker, Michell Instruments Ltd, Cambridge, UK., 2016. [Online]. Available: <http://www.ebookpp.com/mo/mositure-doc.html>.
8. Bakumenko O. I. Novi rozrobki u galuzi viznachenija temperaturi tochki rosi prirodного газу / O. I. Bakumenko // Truboprovodnij transport, № 4 (94), 2015. s. 16-26.
9. Yosyp Y. Bilinsky, Yosip R. Saldan, Kostyantyn V. Ogorodnik, Alexander A. Lazarev, Oksana S. Horodetska, Tomasz Zyska, Aisha Mussabekova, "New ultrasound approaches to measuring material parameters", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085F (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501637.
10. Bilins'kij J.J. Analizator vologosti prirodного газу ta ocinka virogidnosti vimirjuval'nogo kontrolju vologosti/ J.J. Bilins'kij, O.S. Gorodec'ka, V.V. Onushko // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – 2012. – №3. – S. 28-31.

Рецензія/Peer review : 8.4.2019 р. Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В. М.