

Й. Й. Білінський¹
 О. С. Городецька¹
 Д. В. Новицький¹

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДВОКАНАЛЬНОГО НВЧ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

¹Вінницький національний технічний університет

Обґрунтовано вибір хвилеводного надвисокочастотного методу вимірювання вологості природного газу, в якому на відміну від відомих, запропоновано використання біжучої хвилі у хвилеводі, при цьому оцінюються зміни діелектричних властивостей газів у разі їхньої взаємодії з хвилями НВЧ діапазону.

Запропоновано математичну модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу, суть якого полягає у поглинанні НВЧ сигналу, а отже — вимірюванні потужності цього сигналу на виході хвилеводу у разі зміни вологості газу шляхом використання біжучої хвилі. Отримано функцію перетворення та теоретичну залежність, яка свідчить про високу чутливість. Проведено дослідження залежності потужності біжучої хвилі від абсолютної вологості водяної пари за різних значень довжини проходження НВЧ сигналу у вологому середовищі з урахуванням температури та тиску.

На основі проведених досліджень запропоновано двоканальний НВЧ вимірювальний перетворювач вологості природного газу та його математичну модель, яка враховує значення діелектричної проникності газу вимірювального та опорного каналів, а також значення температури та тиску природного газу вимірювального каналу.

Проведено дослідження, які показали, що наявність опорного каналу дозволило підвищити точність вимірювання, оскільки двоканальна система, на відміну від одноканальної, нівелює нестабільність значення вхідного сигналу, поданого генератором.

Описано принцип роботи двоканального НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу, який містить НВЧ генератор, атенюатор, хвилеводний трійник, хвилеводну секцію порівняння, датчик температури та тиску, комутатор порівняльного каналу, вимірювальну кювету, підсилювач, індикаторний пристрій. Результати досліджень дають можливість підтвердити перспективність практичного застосування вимірювання вологості природного газу засобами, основаними на НВЧ методі біжучої хвилі.

Ключові слова: вологість, природний газ, хвилеводний НВЧ метод, біжуча хвиля, двоканальний вимірювальний перетворювач вологості природного газу.

Вступ та постановка задачі

В умовах неперервного зростання об'ємів споживання природного газу та підвищення світових цін на нього, щоразу актуальнішими стають вимоги до якості газу. Одним з основних шляхів забезпечення необхідної якості газу є контроль його вологості. Вологість є одним з основних параметрів у видобутку, транспортуванні й переробці природного (або попутного нафтового) газу. Надійне й точне вимірювання цього параметра потрібно на всіх етапах – від свердловини до газо-переробного заводу, що істотно впливає на економічність й ефективність процесів [1], [2].

Вологовміст у газі характеризується різними фізичними величинами, серед яких найрозповсюдженішими 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 5542-87 [3]. Особливе місце в нормативному забезпеченні якості

природного газу займають стандарти, в яких встановлені методи визначення вмісту в газі води та вуглеводнів, оскільки від достовірності визначення цих показників залежить ефективність і безаварійність транспортування та споживання газу.

Існує багато методів і засобів визначення вологості, які використовуються в лабораторних вимірюваннях за нормальних умов. Однак на практиці потрібно вимірювати вологість в широкому діапазоні зміни тиску і температури, а також у разі високого і середнього тиску в газопроводі. Таке використання потребує розробки надійних, стабільних та стійких до забруднень і високих тисків сенсорів. Завдяки своїй простій, надійній конструкції і доволі високій точності вимірювання вологоміри, що базуються на використанні надвисокочастотного методу, набули широкого використання.

Метою роботи є розробка математичної моделі двоканального НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу.

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

Найперспективнішим є хвилеводний метод, який 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 досліджуваній 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].

Матеріали та результати досліджень

Авторами запропоновано математичну модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу, суть якого полягає у поглинанні НВЧ сигналу, а отже — вимірюванні потужності цього сигналу на виході хвилеводу за зміни вологості газу шляхом використання біжучої хвилі.

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

Потужність випромінювання згасає в результаті проходження біжучої хвилі по хвилеводу за законом [6], [7]

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha l}, \quad (1)$$

де P_0 — вхідна потужність, що поширюється по хвилеводу; l — довжина проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі; α — загальний коефіцієнт поглинання

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_n, \quad (2)$$

де α_v — коефіцієнт поглинання для водяної пари; α_n — коефіцієнт поглинання для природного газу.

α_v та α_n визначаються за формулами

$$\alpha_v = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot 273,2}{760 \cdot T} \cdot \frac{\rho_{v,n}}{\rho_v} \left(\sqrt{(\varepsilon_1' - 1)^2 + (\varepsilon_1'' - 1)^2} - (\varepsilon_1'' - 1) \right)}; \quad (3)$$

$$\alpha_n = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot 273,2}{760 \cdot T} \cdot \left(\sqrt{(\varepsilon_1' - 1)^2 + (\varepsilon_1'' - 1)^2} - (\varepsilon_1'' - 1) \right)}, \quad (4)$$

де λ — довжина хвилі; p — тиск; T — температура; $\rho_{v,n}$ — абсолютна вологість водяної пари; ρ_v — густина води; ε' , ε'' — дійсна та уявна складові комплексної діелектричної проникності.

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

середовищі потужність випромінювання зменшується.

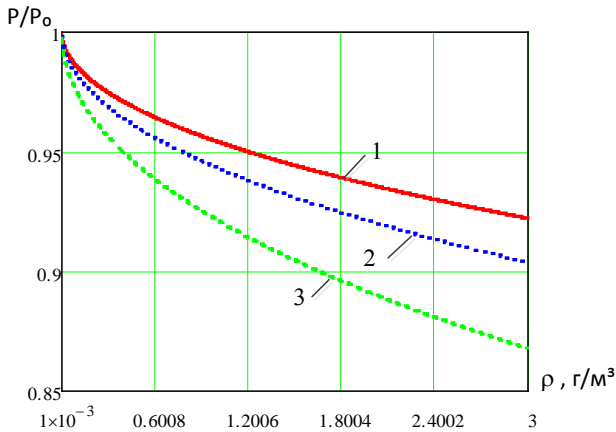


Рис. 1. Залежність відношення вхідної до вихідної потужності випромінювання від абсолютної вологості водяної пари за різних значень довжини проходження НВЧ сигналу: 1 — $l_1 = 0,12$ м; 2 — $l_2 = 0,15$ м; 3 — $l_3 = 0,21$ м

Пристрій на основі хвелеводного НВЧ методу вимірювання вологості природного газу повинен містити НВЧ генератор [8], який буде вносити додаткові похибки. Наявність впливу температури та тиску також будуть вносити додаткові похибки. Для усунення цього недоліку запропоновано використання двоканальної схеми, яка, на відміну від одноканальної, нівелює нестабільність значення вхідного сигналу, поданого генератором. Двоканальна схема містить вимірювальний та опорний канал.

Потужність випромінювання вимірювального каналу згідно з (1) визначається за формулою

$$P_1 = P_0 \cdot e^{-\alpha_1 \cdot l} \quad (5)$$

Потужність випромінювання опорного каналу

$$P_2 = P_0 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot l} \quad (6)$$

Знайшовши відношення P_1/P_2 та прологарифмувавши його, отримаємо

$$\alpha_1 = \alpha_2 - \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/l} \quad (7)$$

З урахуванням формул (3) та (7) абсолютна вологість водяної пари визначається за формулою

$$\rho_{v,n} = \lambda^2 \rho_v \left(\alpha_2 - \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/l} \right)^2 \frac{760 \cdot T}{2\pi^2 p 273,2 \left(\sqrt{(\epsilon_1' - 1)^2 + (\epsilon_1'' - 1)^2} - (\epsilon_1'' - 1) \right)} \quad (8)$$

Вираз (8) є функцією перетворення двоканального вимірювального перетворювача відносної вологості природного газу.

Для визначення вологості природного газу розроблено пристрій, структурна схема якого показана на рис. 2. Структурна схема двоканального НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу на основі хвелеводного методу з біжучою хвилею складається з вимірювального каналу і каналу порівняння.

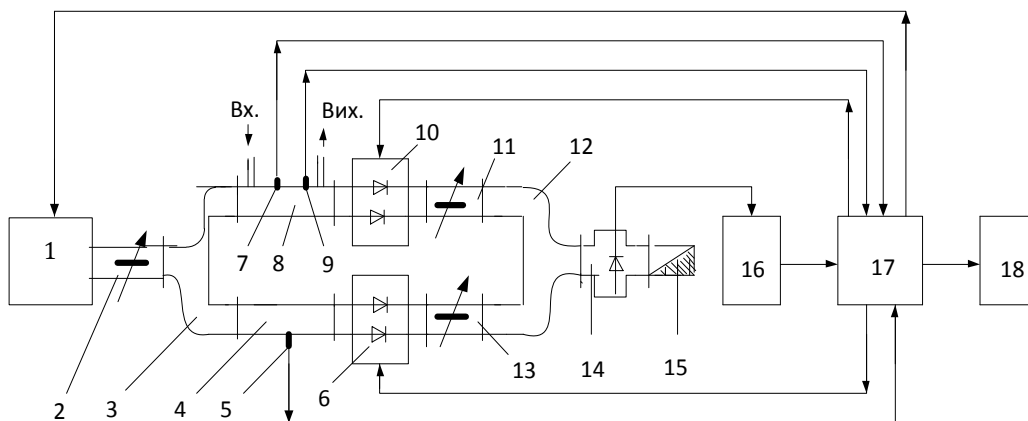


Рис. 2. Структурна схема двоканального НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу:

- 1 — НВЧ генератор; 2 — атенюатор; 3 — хвелеводний трійник; 4 — хвелеводна секція порівняння (порівняльна кювета); 5 — датчик температури; 6 — комутатор порівняльного каналу; 7 — датчик тиску вимірювальної хвелеводної секції; 8 — хвелеводна вимірювальна секція (вимірювальна кювета); 9 — датчик температури; 10 — комутатор вимірювального каналу; 11 і 13 — атенюатори вимірювального каналу і каналу порівняння, відповідно; 12 — хвелеводний трійник; 14 — діодна секція; 15 — узгоджене навантаження; 16 — підсилювач; 17 — мікропроцесор; 18 — індикаторний пристрій

НВЧ генератор 1 зібраний на ПІН-діоді за паралельною схемою. Схема має можливість підлаштувати генератор на обрану частоту. Робоча частота НВЧ генератора 1...10 ГГц [9]. Атенюатор 2 призначений для попереднього налаштування рівня НВЧ сигналу, що надходить на детекторну секцію 14. Трійник 3 розділяє НВЧ сигнал, що виходить від генератора 1 на два канали: вимірювальний і канал порівняння. У каналі порівняння стоїть хвилеводна секція порівняння 4 (кювета порівняння), яка наповнена сухим повітрям за тиску 1 атм і температури 20 °С. За цих параметрів кювета порівняння 4 герметично закривається. Також кювета порівняння 4 забезпечена датчиком температури 5, дані з якого надходять на мікропроцесор 17.

НВЧ вологомір працює таким чином. Комутатори 6 і 10 по черзі перемикають високочастотні сигнали, що проходять по каналу порівняння і по вимірювальному каналу. Частоту комутації задає мікропроцесор 17. За допомогою штуцерів Вх. і Вих. через вимірювальну хвилеводну секцію (вимірювальну кювету) 8 прокачується контрольований природний газ.

Порівняльна і вимірювальна кювети виконані у вигляді круглого хвилеводу з нержавіючої сталі діаметром 3 см. Внутрішня порожнина хвилеводів полірується. Вимірювальна кювета 8 забезпечена датчиками тиску 7 і температури 9. Дані від датчиків 7 і 8 надходять на мікропроцесор 17. Атенюатори 11 і 13 вимірювального та порівняльного каналів, відповідно, виставляють рівні високочастотних сигналів, що проходять по вимірювальному та порівняльному каналах так, щоб вони були рівні один одному, а зміни струму високочастотного діода в діодній секції 14 в залежності від рівня вхідного високочастотного сигналу, припадали на його лінійну ділянку у всьому діапазоні вимірювання вологості природного газу.

Хвилеводний трійник 12 призначений для передачі високочастотних сигналів від вимірювального та порівняльного каналів на діодну секцію 14, в якій змонтований високочастотний германієвий точковий діод Д403. Діод Д403 перетворює високочастотні сигнали від вимірювального та порівняльного каналів в постійні електричні сигнали [10], які надходять на підсилювач 15, де підсилюються і надходять на мікропроцесор 16. Мікропроцесор 16 обробляє електричні сигнали, які на нього надходять, і перетворює їх в зручний для індикації сигнал, який подається на індикаторний пристрій 18.

Діодна секція 14 навантажена на узгоджене навантаження 15, яка поглинає інформацію, яка поглинає високочастотну електромагнітну хвилю, що надходить на неї. Коефіцієнт відображення узгодженого навантаження 15 не перевищує $K_g = 0,02$.

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 природного газу. Проведено дослідження залежності потужності біжучої хвилі від абсолютної вологості водяної пари за різних значень 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.

Запропоновано двоканальний НВЧ вимірювальний перетворювач вологості природного газу та його математичну модель, яка враховує значення діелектричної проникності газу вимірювального та опорного каналів, а також значення температури та тиску природного газу вимірювального каналу. Принцип роботи НВЧ вологоміра базується на хвилеводному НВЧ методі вимірювання вологості природного газу, в якому на відміну від відомих, запропоновано використання біжучої хвилі у хвилеводі, при цьому оцінюються зміни діелектричних властивостей газів за їх взаємодії з хвилями НВЧ діапазону.

Проведені дослідження показали, що наявність опорного каналу підвищує точність вимірювання, оскільки двоканальна система нівелює нестабільність значення вхідного сигналу, що подається генератором. Крім того, використання опорного каналу зменшує похибку вимірювання, оскільки діелектрична проникність газу практично не змінюється у разі зміни його складу.

Описано принцип роботи двоканального НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- [1] М. Мухитдинов, и Э. С. Мусаев, *Оптические методы и устройства контроля влажности*. Москва: Энергоатомиздат, 1986, 96 с.
- [2] М. А. Берлинер, *Измерения влажности*. Москва: Энергия, 1973, 400 с.

- [3] ГОСТ 5542-87 Газ горючий природный для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. Госстандарт России (01.01.1988). Москва: ИПК изд-во стандартов, 2000, 2004.
- [4] G. Korotcenkov, *Handbook of Humidity Measurement*, vol. 1, *Spectroscopic Methods of Humidity Measurement*. CRC Press Published March 26, (2018) Reference, 372 p.
- [5] А. А. Брандт, *Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах*. Москва: Физматгиз, 1963, 404 с.
- [6] Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, и М. В. Венедиктов, *Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов*. Москва: Энергия, 1980, 240 с.
- [7] Rolf Kolass, *Mositure Measurement in Natural Gaz*. Michell Instruments GmbH, Friedrichsdorf, Germany, Cris Parker, Michell Instruments Ltd, Cambridge, UK., 2016. [Online]. Available: <http://www.ebookpp.com/mo/mositure-doc.html> .
- [8] О. І. Бакуменко, «Нові розробки у галузі визначення температури точки роси природного газу,» *Трубопровідний транспорт*, № 4 (94), с. 16-26. 2015.
- [9] Y. Bilinsky, Y. Saldan, K. Ogorodnik, A. Lazarev, and O. Horodetska, «New ultrasound approaches to measuring material parameters,» *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, vol. 108085F, 1 October, 2018, pp. 8.
- [10] Й. Й. Білінський, О. С. Городецька, та В. В. Онушко, «Аналізатор вологості природного газу та оцінка вірогідності вимірювального контролю вологості,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 3, с. 28-31. 2012.

Рекомендована кафедрою електроніки та наносистем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 13.05.2019

Білінський Йосип Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроніки та наносистем; e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Городецька Оксана Степанівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, e-mail: horodecka.os@gmail.com ;

Новицький Дмитро Володимирович — аспірант кафедри електроніки та наносистем.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Y. Y. Bilynsky¹
O. S. Horodetska¹
D. V. Novytskyi¹

Development of Mathematical Model of Two-channel Microwave Measuring Converter of the Humidity of Natural Gas

¹Vinnitsia National Technical University

The choice of the waveguide microwave method of measuring the humidity of natural gas has been substantiated in the article. 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 in the microwave range are estimated.

A mathematical model for the microwave measuring converter 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. The function of conversion and theoretical dependence, which indicates high sensitivity, has been obtained. The dependence of the power of a traveling wave on the absolute humidity of water vapor at various values of the passage of the microwave signal in a humid environment, taking into account temperature and pressure has been investigated.

Based on the research, a two-channel microwave measuring transducer of natural gas and its mathematical model has been proposed. The model takes into account the dielectric constant of the measuring and reference channels, and the temperature and pressure of the natural gas of the measuring channel.

There have been conducted the studies that showed that the presence of the reference channel has improved the measurement accuracy, since the two-channel system, in contrast to the single-channel, eliminates the instability of the value of the input signal supplied by the generator.

The principle of operation of a two-channel microwave measuring transducer of natural gas has been described, which contains a microwave generator, attenuator, waveguide tee, waveguide comparison section, temperature and pressure sensor, reference channel switch, measuring cell, amplifier, display. The research results suggest that it is promising for practical application of measuring the humidity of natural gas devises using tools based on the microwave traveling wave method.

Keywords: humidity, natural gas, waveguide microwave method, traveling wave, two-channel measuring converter of humidity of natural gas.

Bilynsky Yosyp Y. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electronics and Nanosystems; e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Horodetska Oksana S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Telecommunication Systems and Television, e-mail: horodecka.os@gmail.com ;

Novytskyi Dmytro V. — Post-Graduate Student of the Chair of Electronics and Nanosystems

Й. Й. Билинский¹
О. С. Городецкая¹
Д. В. Новицкий¹

Разработка математической модели двухканального СВЧ измерительного преобразователя влажности природного газа

¹Винницкий национальный технический университет

Обоснован выбор волноводного СВЧ метода измерения влажности природного газа, в котором, в отличие от известных, предложено использование бегущей волны в волноводе, при этом оцениваются изменения диэлектрических свойств газов при их взаимодействии с волнами СВЧ диапазона.

Предложена математическая модель СВЧ измерительного преобразователя влажности природного газа, смысл которого заключается в поглощении СВЧ сигнала, а следовательно — измерении мощности этого сигнала на выходе волновода при изменении влажности газа путем использования бегущей волны. Получено функцию преобразования и теоретическую зависимость, которая свидетельствует о высокой чувствительности. Проведено исследование зависимости мощности бегущей волны от абсолютной влажности водяного пара при различных значениях длины прохождения СВЧ сигнала во влажной среде с учетом температуры и давления.

На основе проведенных исследований предложены двухканальный СВЧ измерительный преобразователь влажности природного газа и его математическая модель, учитывающая значение диэлектрической проницаемости газа измерительного и опорного каналов, а также значение температуры и давления природного газа измерительного канала.

Проведены исследования, которые показали, что наличие опорного канала позволило повысить точность измерения, поскольку двухканальная система, в отличие от одноканальной, нивелирует нестабильность значения входного сигнала от генератора.

Описан принцип работы двухканального СВЧ измерительного преобразователя влажности природного газа, который содержит СВЧ генератор, аттенюатор, волноводный тройник, волноводную секцию сравнения, датчик температуры и давления, коммутатор сравнительного канала, измерительную кювету, усилитель, индикации. Результаты исследований позволяют подтвердить перспективность практического применения измерителя влажности природного газа средств, основанного на СВЧ методе бегущей волны.

Ключевые слова: влажность, природный газ, волноводный СВЧ метод, бегущая волна, двухканальный измерительный преобразователь влажности природного газа.

Билинский Иосиф Иосифович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и наносистем; e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Городецкая Оксана Степановна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: horodecka.os@gmail.com ;

Новицкий Дмитрий Владимирович — аспирант кафедры электроники и наносистем