

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НВЧ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто проблему забезпечення необхідної точності оцінки якості природного газу, 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), з урахуванням нових сучасних концепцій до реалізації його обліку. Особливо небезпечною та, відповідно, важливою є проблема присутності вологи, оскільки під час транспортування газу можуть спостерігатися випадки корозії трубопроводів і арматури, а також утворення гідратів (продуктів приєднання води до різних речовин) та конденсату.

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

Оскільки природний газ можна розглянути як бінарну гетерогенну структуру двох діелектриків природного газу та води, запропоновано еквівалентну схему, за допомогою якої можна враховувати діелектричні втрати в системі конденсаторів за певної частоти електричного сигналу.

Виконано моделювання еквівалентної схеми надвисокочастотного вимірювального перетворювача вологості природного газу та наведено результати цього моделювання.

Проведено експериментальні дослідження надвисокочастотного вимірювального перетворювача вологості природного газу. З цією метою розроблено методику досліджень з використанням спеціалізованого обладнання та засобів вимірювання — зразковий генератор вологості природного газу «Родник-2», стаціонарна калібрувальна система *Michell Dew Point Calibration System Precision Dewpointmeter* фірми *Michell Instruments* і калькулятор *Free Professional Online Humidity Calculator*. Результати експериментальних досліджень, а також моделювання підтверджують адекватність розробленої математичної моделі надвисокочастотного вимірювального перетворювача вологості природного газу.

Ключові слова: вологість, природний газ, надвисокочастотний вимірювальний перетворювач, біжуча хвиля, експериментальні дослідження, моделювання.

Вступ

Однією з найважливіших задач під час транспортування природного газу є оцінка його якості, під якою розуміють відповідність складу газу певним значенням його основних характеристик, таких як теплотворна здатність, вміст вологи та наявність корозійно-активних компонентів (сірководень, вуглекислий газ тощо). З урахуванням світової тенденції підвищення цін на енергоносії, зокрема на природний газ, актуальним є питання забезпечення необхідної точності вимірювань з урахуванням нових сучасних концепцій до реалізації його обліку.

Однією з найвагоміших складових природного газу є домішки води, присутність якої небажана, оскільки під час транспортування газу можуть спостерігатися випадки корозії трубопроводів і арматури, а також утворення гідратів (продуктів приєднання води до різних речовин) та конденсату [1], [2].

Кількісно вологовміст у газі може характеризуватися різними фізичними величинами, серед

яких найрозповсюдженішими є абсолютна вологість, молярна (об'ємна) частка вологи, об'ємний вологовміст, температура точки роси, відносна вологість.

Існує велика кількість методів і засобів визначення вологості, але не всі придатні для вимірювання вологості природного газу. До них відносяться хвильові, загально-фізичні, фізико-хімічні, фізичні. На сьогодні основним методом вимірювання вологості природного газу є метод точки роси, який відноситься до фізико-хімічних. Разом з ним широко розвиваються хвильові методи, до яких відноситься і НВЧ метод, який дозволяє здійснювати вимірювальне перетворення шляхом поглинання НВЧ сигналу. Тобто, вимірювання потужності сигналу відбувається на виході хвилеводу при зміні вологості газу завдяки використанню біжучої хвилі. Дослідження засобу вимірювального контролю вологості природного газу НВЧ типу розглянуто в цій роботі.

Таким чином, метою роботи є підтвердження адекватності математичної моделі хвилеводного НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу шляхом проведення моделювання вимірювального перетворювача та експериментальних досліджень.

Основна частина

В роботі [6] 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 з використанням 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 [3]

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

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

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (2)$$

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

Коефіцієнти поглинання для водяної пари та газу згідно з [6] визначаються так:

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{273,2 \cdot p}{760 \cdot T} \cdot \frac{\rho_{\text{в.п.}}}{\rho_{\text{в.}}}} \left(\sqrt{E_1'^2 + E_1''^2} - E_1'' \right); \quad (3)$$

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

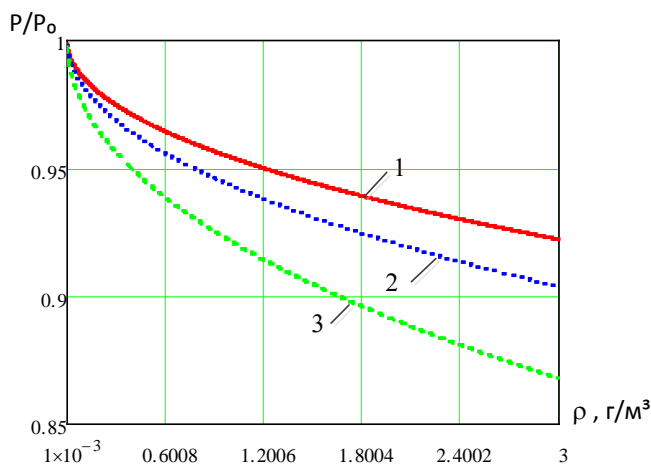


Рис. 1. Залежність відношення вхідної до вихідної потужності випромінювання від абсолютної вологості водяної пари за різних значень довжини проходження НВЧ сигналу:

1 — $l_1 = 0,12$ м; 2 — $l_2 = 0,15$ м; 3 — $l_3 = 0,21$ м

де λ — довжина хвилі; p — тиск; T — температура; $\rho_{\text{в.}} —$ густина води; $\rho_{\text{в.п.}}$ — абсолютна вологість водяної пари; E_1' — дійсна діелектрична проникність водяної пари; E_1'' — уявна діелектрична проникність водяної пари; E_2' — дійсна діелектрична проникність природного газу; E_2'' — уявна діелектрична проникність природного газу.

Залежність відношення вихідної до вхідної потужності випромінювання від абсолютної вологості водяної пари показана на 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 [6].

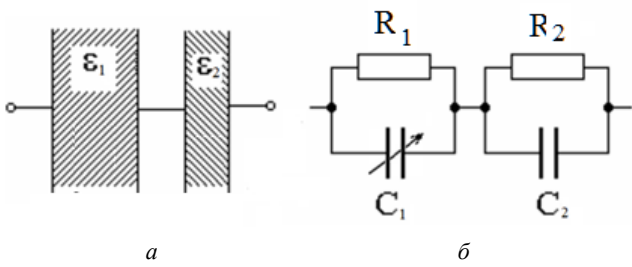


Рис. 2: а — бінарна гетерогенна система;
б — еквівалентна схема бінарної гетерогенної структури

Природний газ можна розглянути як бінарну гетерогенну структуру двох діелектриків — природного газу та води (рис. 2а). Це означає, що цю структуру можна замінити еквівалентною схемою, що складається з двох конденсаторів, один з яких є змінний (рис. 2б). Таким чином можна враховувати діелектричні втрати в системі конденсаторів за певної частоти електричного сигналу [7].

Потужність еквівалентної схеми розраховується за формулою

$$P = U^2 / Z, \quad (4)$$

де U — напруга, а опір визначається як $Z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}$.

$$\text{При цьому } r_1 = \frac{1}{R_1} / Y_1^2; \quad r_2 = \frac{1}{R_2} / Y_2^2; \quad x_2 = \frac{1}{\omega C_2} / Y_2^2; \quad x_1 = \frac{1}{\omega C_1} / Y_1^2,$$

$$\text{де } Y_1^2 = \left(\frac{1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_1}\right)^2, \quad Y_2^2 = \left(\frac{1}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2.$$

В загальному вигляді потужність еквівалентної схеми, враховуючи (4), та на основі вищевказаних виразів визначається як

$$P = U^2 / \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_1}\right)^2} + 2 \frac{\frac{1}{R_1 R_2} + \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2}}{\left(\left(\frac{1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_1}\right)^2\right) \left(\left(\frac{1}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2\right)} + \frac{1}{\left(\frac{1}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}}. \quad (5)$$

Еквівалентна схема, промодельована в пакеті Work Bench (рис. 3).

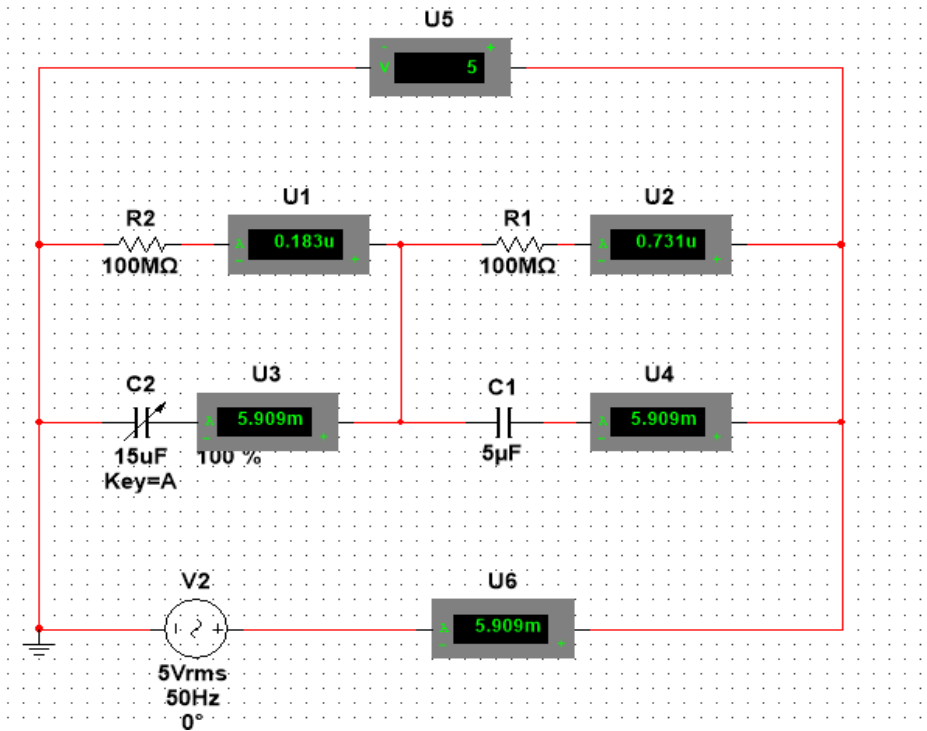


Рис. 3. Еквівалентна схема вимірювального перетворювача вологості газу в пакеті Work Bench

Промодельовавши еквівалентну схему, отримано характеристики зі значеннями ємностей конденсаторів C_1 та C_2 з різницею в 1, 2 та 3 рази, що показано на рис. 4а, б, в, відповідно.

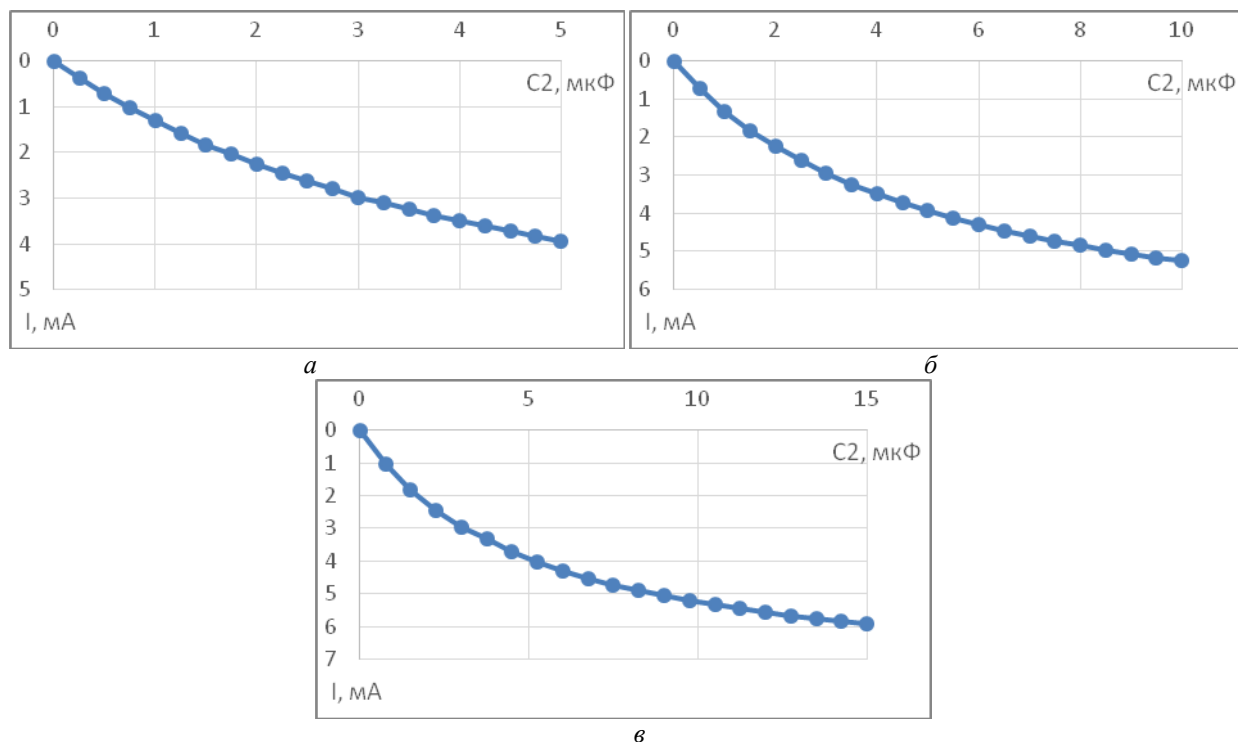


Рис. 4. Передатні характеристики за різних значень ємностей конденсаторів C_1 та C_2 : а — однакові значення; б — з різницею в 2 рази; в — з різницею в 3 рази

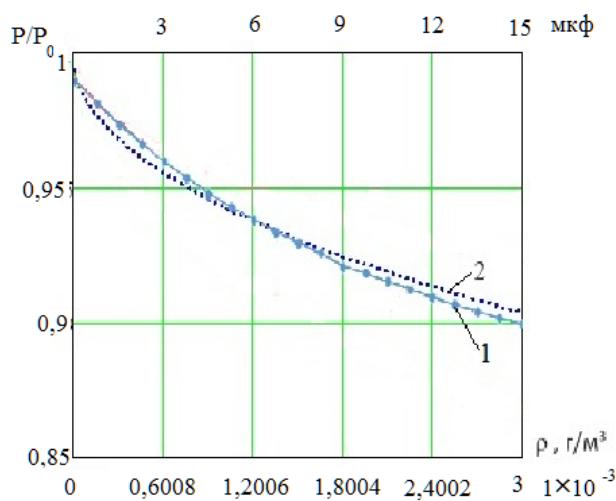


Рис. 5. Характеристики: 1 — запропонованої математичної моделі НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу; 2 — отримана внаслідок моделювання еквівалентної схеми

На рис. 5 показано характеристики запропонованої математичної моделі НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу та характеристики, отриманої внаслідок моделювання еквівалентної схеми.

Як видно з рис. 5 за результатами моделювання можна стверджувати, що похибка відхилення характеристики, отриманої внаслідок моделювання еквівалентної схеми, від запропонованої математичної моделі НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу не перевищує 3 %.

В роботі проведені експериментальні дослідження вимірювального перетворювача вологості природного газу. З цією метою розроблена методика досліджень з використанням спеціалізованого обладнання та засобів вимірювання.

Для проведення експериментальних досліджень використовувався зразковий генератор вологості природного газу «Родник-2» і стаціонарна калібрувальна система Michell Dew Point Calibration System Precesion Dewpointmeter фірми Michell Instruments.

На рис. 6 показано зовнішній вигляд засобу вимірювального контролю вологості природного газу та керувального ПК.

Дослідження НВЧ вологоміра проводилися за температури 20°C , тиску — одна атмосфера та швидкості потоку газу 10 л/хв . Розхід газу складав $2 \text{ дм}^3/\text{хв}$. Отримані значення вологості за точкою роси за допомогою калькулятора Free Professional Online Humidity Calculator перераховувалися в абсолютну вологість.



Рис. 6. Зовнішній вигляд засобу вимірювального контролю вологості природного газу та керувального ПК

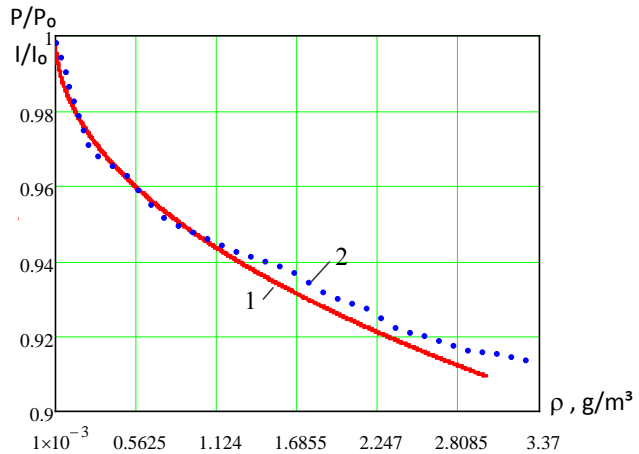


Рис. 7. Статичні характеристики НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу: 1 — теоретична; 2 — експериментальна

Теоретичну та експериментальну статичні характеристики перетворювача вологості показано на рис. 7.

Як видно з рисунка, відхилення експериментальної характеристики від теоретичної не перевищує 5 %.

Результати експериментальних досліджень, а також моделювання підтверджують адекватність математичної моделі НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу.

Висновки

Проведено дослідження еквівалентної схеми, що описує бінарну гетерогенну систему, якій відповідає математична модель НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу. Дослідження проводились зі значеннями ємностей конденсаторів C_1 та C_2 з різницею в 1, 2 та 3 рази. Внаслідок порівняння характеристики отриманої еквівалентної схеми та запропонованої математичної моделі НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу, встановлено, що похибка відхилення не перевищує 3 %. Експериментальні дослідження показали, що похибка математичної моделі не перевищує 5 %. Це говорить про адекватність запропонованої математичної моделі НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Й. Й. Білинський, О. С. Городецька, Д. В. Новицький, «Аналіз методів та засобів визначення температури точки роси за вологою та вуглеводнями», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 110-117, 2018.
- [2] М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев, *Оптические методы и устройства контроля влажности*. М.: Энергоатомиздат, 1986, 96 с.
- [3] М. А. Берлинер, *Измерения влажности*. М.: Энергия, 1973, 400 с.
- [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*. М.: Физматгиз, 1963, 404 с.
- [6] Й. Й. Білинський, О. С. Городецька, Д. В. Новицький, «Розробка математичної моделі хвильового НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3, с. 131-136, 2019.
- [7] Ю. М. Поплавко, *Физика диэлектриков*. Київ: Вища школа, 1980, 398 с.

Рекомендована кафедрою електроніки та наносистем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 22.01.2021

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

Книш Богдан Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедри електроніки та наносистем, e-mail: tutmos-3@i.ua ;

Новицький Дмитро Володимирович — аспірант кафедри електроніки та наносистем.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Yo. Yo. Bilynskiy¹
 B. P. Knysh¹
 D. V. Novytskyi¹

The Modeling and the Experimental Researches of the Microwave-Measuring Transformer of the Humidity of Natural Gas

¹Vinnitsia National Technical University

There has been considered the problem of ensuring the accuracy of quality assessment of natural gas when the composition of gas is in accordance with the specific values of its main physical properties (a calorific value, a rate of moisture, the presence of corrosive components (hydrogen sulfide, carbon dioxide, etc.)) and its possible solving grounded in the modern gas measuring approaches. The most dangerous and, in this way, important is an issue with a humidity presence inside of a gas mix because it can cause such negative outcomes as the corrosion of the pipelines and armatures, the formation of hydrates (composition of water and other agents) and the condensates.

There has been proposed the math model of microwave-measuring transforming of natural gas humidity bases on the absorbing of a microwave signal and, in such a way, measuring of signal volume on the end of a waveguide during the changing of the gas humidity. To do this, we use the properties of running wave. The natural gas can be presented as the binary heterogeneous structure of two dielectrics (water-gas), so the equivalent scheme allows us measure the electric losses in a capacitor system using the know frequency of an electric signal.

The modeling of an equivalent scheme of a microwave-measuring transformer of natural gas humidity and its main results has been presented.

The experimental researches of a microwave-measuring transformer of natural gas humidity have been carried out. For this purpose, the research methodology was developed and specific instruments and measuring devices were implemented: the model generator of natural gas humidity "Rodnic-2", the stationary gauge system Mitchell Dew Point Calibration System Precesion Dewpointmeter produced by Michell Instruments and calculator Free Professional Online Humidity Calculator. The results of the experimental researches and modeling confirm the adequacy of the developed model of a microwave-measuring transformer of natural gas humidity.

Keywords: humidity, natural gas, ultrahigh-frequency measuring transducer, traveling wave, experimental research, modeling.

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

Knysh Bohdan P. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electronics and Nanosystems, e-mail: tutmos-3@i.ua ;

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

И. И. Билинский¹
 Б. П. Кныш¹
 Д. В. Новицкий¹

Моделирование и экспериментальные исследования СВЧ измерительного преобразователя влажности природного газа

¹Винницкий национальный технический университет

Рассмотрена проблема обеспечения требуемой точности оценки качества природного газа, под которой понимают соответствие его состава определенным значением его основных характеристик, таких как теплотворная способность, содержание влаги и наличие коррозионно-активных компонентов (сероводород, углекислый газ), с учетом новых современных концепций к реализации его учета. Особенно опасной и, соответственно, важной является проблема присутствия влаги, так как при транспортировке газа могут наблюдаться случаи коррозии трубопроводов и арматуры, а также образование гидратов (продуктов присоединения воды к различным веществам) и конденсата.

Предложена математическая модель сверхвысокочастотного измерительного преобразователя влажности природного газа, суть которого заключается в поглощении сверхвысокочастотного сигнала, а следовательно измерении мощности этого сигнала на выходе волновода при изменении влажности газа с использованием бегущей волны.

Поскольку природный газ можно рассмотреть как бинарную гетерогенную структуру двух диэлектриков

природного газа и воды, предложено эквивалентную схему, с помощью которой можно учитывать диэлектрические потери в системе конденсаторов при определенной частоте электрического сигнала.

Выполнено моделирование эквивалентной схемы сверхвысокочастотного измерительного преобразователя влажности природного газа и приведены результаты этого моделирования.

Проведены экспериментальные исследования сверхвысокочастотного измерительного преобразователя влажности природного газа. С этой целью разработана методика исследований с использованием специализированного оборудования и средств измерения — образцовый генератор влажности природного газа «Родник-2», стационарная калибровочная система *Michell Dew Point Calibration System Precesion Dewpointmeter* фирмы *Michell Instruments* и калькулятор *Free Professional Online Humidity Calculator*. Результаты экспериментальных исследований, а также моделирования подтверждают адекватность разработанной математической модели сверхвысокочастотного измерительного преобразователя влажности природного газа.

Ключевые слова: влажность, природный газ, сверхвысокочастотный измерительный преобразователь, бегущая волна, экспериментальные исследования, моделирование.

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

Кныш Богдан Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и наносистем, e-mail: tutmos-3@i.ua ;

Новицкий Дмитрий Владимирович — аспирант кафедры электроники и наносистем