

ISSN 2226-3780

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ И РЕЗЕРВЫ ПРОИЗВОДСТВА



№ 2/1 (52),
2020

TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES

№ 2/1(52), 2020

CONTENTS



TECHNOLOGY AND SYSTEM OF POWER SUPPLY

- 4** Complex thermodynamic analysis of the heat-technological complex of sugar production: analysis method
Vasilenko S., Samilenko S., Bondar V., Bilyk O.



REPORTS ON RESEARCH PROJECTS

- 12** Assessment of the authenticity of a semiempirical turbulent combustion method in afterburner of a gas turbine engine
Loginov V., Rublov V., Yelansky A.
- 16** Research of nonlinear dynamic deformation of spatial bodies with cracks
Bazhenov V., Vabishevich M.
- 19** Determination of geometric and kinematic characteristics of FDM 3D print process
Oleksyshen V., Sokolskyi A., Kolosov A., Solovei V.
- 22** Research of temperature change of pavement heating in the process of hot in-place recycling of asphalt concrete
Savenko V., Illiash S., Stasiuk T.
- 25** Evaluation of the surface energy of dispersed aluminium oxide using Owens-Wendt theory
Myronyuk O., Baklan D., Nudchenko L.
- 28** Research of the wear resistance of multi-component bronze in the conditions of the hydraulic oil processed by the power field
Onopreichuk D., Stefanov V.
- 32** Numerical simulation of the outflow of two phase flow from detonation unit barrel
Zorik I.
- 38** Analysis of strength and deformativity of glass plate joints under static loading
Surmai M., Tkach R.
- 42** Development of a mathematical model of measuring control device of natural gas humidity
Bilynsky Y., Horodetska O., Novytskyi D., Voytsekhovska O.
- 46** Circuit design of buck-voltage converter with digital control system
Zheliashkov Y.
- 51** Abstracts and References

Редакційна колегія

Головний редактор

Луценко Ігор Анатолійович, д. т. н., професор, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського

Відповідальний редактор з технічних наук

Yusaf Talal, Professor, University of Southern Queensland, Australia

Відповідальний редактор з економічних наук

Skibniewski Mirosław, Professor, University of Maryland, United States

Заступник головного редактора

Дудніков Анатолій Андрійович, к. т. н., професор, Полтавська державна аграрна академія

Відповідальний секретар

Біловод Олександра Іванівна, к. т. н., доцент, Полтавська державна аграрна академія

Машинобудування

Акімов Олег Вікторович, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; **Воденников Сергій Анатолійович**, д. т. н., проф., Запорізька державна інженерна академія; **Гондляр Олександр Володимирович**, д. т. н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; **Горик Олексій Володимирович**, д. т. н., проф., Полтавська державна аграрна академія; **Дудніков Ігор Анатолійович**, к. т. н., доц., Полтавська державна аграрна академія; **Касьянов Володимир Олександрович**, д. т. н., проф., Національний авіаційний університет, Київ; **Жидрачук Мирослав Васильович**, д. т. н., проф., Національний авіаційний університет, Київ; **Крутіков Геннадій Анатолійович**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; **Пермяков Олександр Анатолійович**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; **Петраков Юрій Володимирович**, д. т. н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; **Самородов Вадим Борисович**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; **Шейченко Віктор Олександрович**, д. т. н., проф., Полтавська державна аграрна академія; **Якно Олег Михайлович**, д. т. н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; **Ng Eddie Yin Kwee**, Associate Professor, Nanyang Tech University, Singapore; **Petrescu Florian Ion Tiberiu**, Bucharest Polytechnic University, Romania; **Rao Ravipudi Venkata**, Professor, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat, India; **Tee Kong Fah**, PhD, University of Greenwich, United Kingdom; **Zhou Ling**, Dr., National Research Center of Pumps, Jiangsu University, China

Енергетика

Артеменко Сергій Вікторович, д. т. н., проф., Одеська національна академія харчових технологій; **Борц Борис Вікторович**, д. т. н., стар. наук. спів., Національний науковий центр, Харківський фізико-технічний інститут НАН України; **Воляський Роман Сергійович**, к. т. н., доцент, Дніпровський державний технічний університет; **Січчук Олег Миколайович**, д. т. н., проф., ДВНЗ «Криворізький національний університет, Київ; **Соловей Віктор Васильович**, д. т. н., проф., Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків; **Ahmadi Mohammad Hossein**, Associate Professor, Shahrood University of Technology, Iran; **Calise Francesco**, Associate Professor, University of Naples Federico II, Italy; **Chen Wei-Hsin**, Professor, National Cheng Kung University, Taiwan; **Hussein Ahmed Madhim**, Associate Professor, University of Babylon, Iraq; **Lungu Mihai**, Associate Professor, University of Craiova, Romania; **Yilbas Bekir Sami**, Professor, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia

Інформаційно-керуючі системи

Бушувєв Сергій Дмитрович, д. т. н., проф., Київський національний університет будівництва і архітектури; **Довбиш Анатолій Степанович**, д. т. н., проф., Сумський державний університет; **Литвиш Василь Володимирович**, д. т. н., проф., Національний університет «Львівська політехніка»; **Теслюк Василь Миколайович**, д. т. н., проф., Національний університет «Львівська політехніка»; **Філоненко Сергій Федорович**, д. т. н., проф., Національний авіаційний університет, Київ; **Ayag Zeki**, Professor, Kadir Has University, Turkey; **Ibas Asier**, Associate Professor, Autonomous University of Barcelona, Spain; **Fera Marcello**, University of Campania «Luigi Vanvitelli», Italy; **Jorgensen Palle**, Professor, University of Iowa, United States; **Nagano Marcelo**, Professor, University of Sao Paulo, Brazil; **Mishra Vishnu Narayan**, Assistant Professor, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat, India

Хімічна інженерія

Білик Олена Анатоліївна, к. т. н., доцент, Національний університету харчових технологій, Київ; **Вамболь Сергій Олександрович**, д. т. н., проф., Національний університет цивільного захисту України, Харків; **Горобець Світлана Василівна**, д. т. н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; **Мандрик Олег Миколайович**, д. т. н., проф., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; **Маринін Андрій Іванович**, к. т. н., стар. наук. спів., Національний університет харчових технологій, Київ; **Паска Марія Зіновіївна**, д. в. н., проф., Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького; **Прісс Олеса Петрівна**, д. т. н., професор, Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь; **Свідерський Валентин Анатолійович**, д. т. н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; **Склябіньський Всеволод Іванович**, д. т. н., проф., Сумський державний університет; **Федоренко Олена Юріївна**, д. т. н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; **Batalha Gilmar Ferreira**, Associate Professor, University of Sao Paulo, Brazil; **Diego Elustondo**, Professor, Luleå University of Technology, Sweden; **Karak Niranjan**, Professor, Tezpur University, India; **Magiera Janusz**, Professor, Institute of Chemical and Process Engineering, Cracow University of Technology, Poland; **Zhang Jin**, Associate Professor, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, China

Міжнародна представленість та індексація журналу:

- ✓ Index Copernicus.
- ✓ Ulrich's Periodicals Directory.
- ✓ OpenAIRE.
- ✓ Bielefeld Academic Search Engine (BASE).
- ✓ Російський індекс научного цитування (РИНЦ).
- ✓ Directory of Open Access Journals (DOAJ).
- ✓ WorldCat.
- ✓ EBSCO.
- ✓ CrossRef.
- ✓ WorldWideScience.org.
- ✓ Scholar Article Journal Index (SAJI).
- ✓ CNKI Scholar.
- ✓ Microsoft Academic Search.
- ✓ Соцкомер.
- ✓ Zeitschriftendatenbank (ZDB).
- ✓ EconBiz.
- ✓ MIAR (Information Matrix for the Analysis of Journals).
- ✓ Scilit.
- ✓ EconPapers.
- ✓ IDEAS.
- ✓ ERIH PLUS (The European Reference Index for the Humanities and the Social Sciences).
- ✓ Dimensions.
- ✓ Julkaisuforum.
- ✓ FSTA (Food Science and Technology Abstracts).

Засновники

ПП «Технологічний Центр»
Полтавська державна аграрна академія

Видавництво

ПП «Технологічний Центр»

Свідоцтво про державну реєстрацію журналу

Серія КВ № 18226-7026P

Атестовано Наказом Міністерства освіти і науки України № 1528 від 29.12.2014

Наказом Міністерства освіти і науки України № 612 від 07.05.2019 (**Категорія Б**)

Рекомендовано Вченою Радою Полтавської державної аграрної академії
Протокол № 14 від 03.03.2020

Адреса редакції та видавництва

вул. Шатилова дача, 4, м. Харків, Україна, 61145
<http://tarp.net.ua/>, <http://journals.urau.ua/tarp/>

Підписано до друку 05.03.2020

Ум. друк. арк. 7,5. Обл.-вид. арк. 6,98

Формат 60x84 1/8. Ціна договірна. Наклад 300 прим.

Підписка оформлюється через редакцію

Тел.: +38 (057) 750-89-90

E-mail: tarp.nauka@gmail.com

Editorial board

Editor-in-Chief

Lutsenko Igor, Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine

Associate Editor of Technical Sciences

Yusaf Talal, Professor, University of Southern Queensland, Australia

Associate Editor of Economic Sciences

Skibniewski Mirosław, Professor, University of Maryland, United States

Deputy Editor-in-Chief

Dudnikov Anatolii, Professor, Poltava State Agrarian Academy, Ukraine

Assistant Editor

Bilovod Oleksandra, Associate Professor, Poltava State Agrarian Academy, Ukraine

Mechanical Engineering

Akimov Oleg, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Vodennikov Sergii**, Professor, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine; **Goryk Oleksii**, Professor, Poltava State Agrarian Academy, Ukraine; **Dudnikov Igor**, Associate Professor, Poltava State Agrarian Academy, Ukraine; **Gondliakh Oleksandr**, Professor, National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Kasianov Vladimir**, Professor, National Aviation University, Kyiv, Ukraine; **Kindrachuk Myroslav**, Professor, National Aviation University, Kyiv, Ukraine; **Krutikov Gennadij**, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Permyakov Aleksander**, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Petrakov Yuri**, Professor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Samorodov Vadim**, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Sheychenko Viktor**, Professor, Poltava State Agrarian Academy, Ukraine; **Yakhno Oleg**, Professor, National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Ng Eddie Yin Kwee**, Associate Professor, Nanyang Tech University, Singapore; **Petrescu Florian Ion Tiberiu**, Bucharest Polytechnic University, Romania; **Rao Ravipudi Venkata**, Professor, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat, India; **Tee Kong Fah**, PhD, University of Greenwich, United Kingdom; **Zhou Ling**, Dr., National Research Center of Pumps, Jiangsu University, China

Energy

Artemenko Sergiy, Professor, Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine; **Borts Boris**, Senior Researcher, National Science Center, Kharkiv Institute of Physics and Technology, Ukraine; **Volianskiy Roman**, Associate Professor, Dniprovsk State Technical University, Ukraine; **Sinchuk Oleg**, Professor, Kryvyi Rih National University, Ukraine; **Solovey Victor**, A. M. Pidhorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine; **Ahmadi Mohammad Hossein**, Associate Professor, Shahrood University of Technology, Iran; **Calise Francesco**, Associate Professor, University of Naples Federico II, Italy; **Chen Wei-Hsin**, Professor, National Cheng Kung University, Taiwan; **Hussein Ahmed Kadhim**, Associate Professor, University of Babylon, Iraq; **Lungu Mihai**, Associate Professor, University of Craiova, Romania; **Yilbas Bekir Sami**, Professor, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia

Information and Control Systems

Bushuyev Sergey, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine; **Dovbysh Anatoly**, Professor, Sumy State University, Ukraine; **Lytvyn Vasyi**, Professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine; **Teslyuk Vasyi**, Professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine; **Filonenko Sergii**, National Aviation University, Kyiv, Ukraine; **Ayag Zeki**, Professor, Kadir Has University, Turkey; **Ibeas Asier**, Associate Professor, Autonomous University of Barcelona, Spain; **Fera Marcello**, University of Campania «Luigi Vanvitelli», Italy; **Jorgensen Palle**, Professor, University of Iowa, United States; **Nagano Marcelo**, Professor, University of Sao Paulo, Brazil; **Mishra Vishnu Narayan**, Assistant Professor, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat, India

Chemical Engineering

Bilyk Olena, Associate Professor, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; **Vambol Sergii**, Professor, National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine; **Gorobets Svitlana**, Professor, National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Sviderskiy Valentin**, Professor, National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Mandryk Oleg**, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine; **Marynin Andrii**, Senior Researcher, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; **Paska Maria**, Professor, Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S. Z. Gzhytskyi; **Priss Olesia**, Professor, Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, Ukraine; **Sklabinskyi Vsevolod**, Professor, Sumy State University, Ukraine; **Fedorenko Olena**, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine; **Batalha Gilmar Ferreira**, Associate Professor, University of Sao Paulo, Brazil; **Diego Elustondo**, Professor, Luleå University of Technology, Sweden; **Karak Niranjan**, Professor, Tezpur University, India; **Magiera Janusz**, Professor, Institute of Chemical and Process Engineering, Cracow University of Technology, Poland; **Zhang Jin**, Associate Professor, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, China

International Abstracting and Indexing:

- ✓ Index Copernicus.
- ✓ Ulrich's Periodicals Directory.
- ✓ OpenAIRE.
- ✓ Bielefeld Academic Search Engine (BASE).
- ✓ Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).
- ✓ Directory of Open Access Journals (DOAJ).
- ✓ WorldCat.
- ✓ EBSCO.
- ✓ CrossRef.
- ✓ WorldWideScience.org.
- ✓ Scholar Article Journal Index (SAJI).
- ✓ CNKI Scholar.
- ✓ Microsoft Academic Search.
- ✓ СоцХарактер.
- ✓ Zeitschriftendatenbank (ZDB).
- ✓ EconBiz.
- ✓ MIAR (Information Matrix for the Analysis of Journals).
- ✓ Scilit.
- ✓ EconPapers.
- ✓ IDEAS.
- ✓ ERIH PLUS (The European Reference Index for the Humanities and the Social Sciences).
- ✓ Dimensions.
- ✓ Julkaisuforummi.
- ✓ FSTA (Food Science and Technology Abstracts).

Establishers

Private Company «Technology Center»
Poltava State Agrarian Academy

Publisher

PC «Technology Center»

State Registration Certificate of the journal

KB № 18226-7026P

Certificated by Order of the MES of Ukraine No. 1528 from 29.12.2014

Order of the MES of Ukraine No. 612 from 07.05.2019 (**Category B**)

Recommended by Academic Council of Poltava State Agrarian Academy
Protocol No. 14, 03.03.2020

Editorial office and publishing house addresses

Shatilova dacha st., 4, Kharkiv, Ukraine, 61145
<http://tarp.net.ua/>, <http://journals.uran.ua/tarp/>

Signed for publication on 05.03.2020

Conventional printed sheet 7.5. Publisher's signature 6.98

Format 60x84 1/8. Price is negotiable. Circulation is 300 copies.

Subscription is made through the editorial office

Tel.: +38 (057) 750-89-90

E-mail: tarp.nauka@gmail.com

**Bilynsky Y.,
Horodetska O.,
Novytskyi D.,
Voytsekhovska O.**

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF MEASURING CONTROL DEVICE OF NATURAL GAS HUMIDITY

Об'єктом дослідження є вимірювальний контроль вологості природного газу. Існує багато методів і засобів визначення вологості, які використовуються в лабораторних вимірюваннях при нормальних умовах. Однак на практиці потрібно вимірювати вологість в широкому діапазоні зміни тиску та температури, а також при високому та середньому тиску в газопроводі. Таке використання потребує розробки сенсорів, які є надійними, стабільними та стійкими до забруднень і високих тисків. Завдяки своїй простій, надійній конструкції та доволі високій точності вимірювання вологоміри, що базуються на використанні надвисокочастотного методу, набули широкого використання.

На основі проведених досліджень запропоновано засіб вимірювального контролю вологості природного газу на основі надвисокочастотного методу вимірювання вологості, в якому, на відміну від відомих, запропоновано використання біжучої хвилі у хвилеводі. При цьому оцінюються зміни діелектричних властивостей газів при їх взаємодії з хвилями надвисокочастотного діапазону. Проведено дослідження, які показали, що наявність порівняльного каналу дозволило підвищити точність вимірювання, оскільки двоканальна система, на відміну від одноканальної, нівелює нестабільність значення вхідного сигналу, що подається генератором.

Описано принцип роботи засобу вимірювального контролю вологості природного газу, який містить надвисокочастотний генератор, атенюатори, хвилеводні трійники, хвилеводну секцію порівняння, датчик температури та тиску, комутатори порівняльного та вимірювального каналів, вимірювальну кювету, підсилювач, мікропроцесор, індикаторний пристрій.

Розроблено математичну модель засобу вимірювального контролю вологості природного газу, яка враховує значення діелектричної проникності газу вимірювального та опорного каналів та містить коефіцієнти корегування за температурою, використання яких дозволяє підвищити точність вимірювання вологості.

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

Ключові слова: надвисокочастотний метод, біжуча хвиля, математична модель, засіб вимірювального контролю вологості природного газу.

Received date: 06.02.2020

Accepted date: 02.03.2020

Published date: 30.04.2020

Copyright © 2020, Bilynsky Y., Horodetska O., Novytskyi D., Voytsekhovska O.

This is an open access article under the CC BY license

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

1. Introduction

The measurement and control of gas quality parameters is an urgent task of both modern science and its various applications in the national economy. Quality indicators strongly affect the cost of products. Humidity is one of the main parameters in the production, transportation and processing of natural (or associated petroleum) gas [1, 2]. Today, there are a large number of different means of monitoring gas humidity, have a number of disadvantages, namely low accuracy, sensitivity and speed in the entire measurement range [3, 4]. Many methods are already deprived of the possibility of increasing accuracy. Therefore, the problem arises of applying new approaches to significantly improve the quality parameters meters, aimed at increasing their stability, accuracy, sensitivity. To date, methods using the microwave frequency range have gained widespread use due to their simple, reliable design and fairly high measurement accuracy. So, *the object of research* is the measuring control of the humidity of natural gas. *The aim of*

research is to increase the accuracy of measuring devices for controlling the humidity of natural gas and developing its mathematical model.

2. Methods of research

In [5], the choice of the microwave method for measuring the humidity of natural gas was justified, in which, in contrast to the known methods, the use of a traveling wave in a waveguide is proposed. In this case, changes in the dielectric properties of gases during their interaction with microwave waves are estimated.

The essence of the microwave measurement conversion of natural gas moisture is to absorb the microwave signal, and therefore 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 authors proposed a mathematical model of such a microwave measuring conversion of natural gas moisture [5]. The conducted studies of the dependence of the traveling wave power on the absolute

humidity of water vapor at various values of the microwave signal transmission length in a humid environment, taking into account temperature and pressure. It is found that with increasing absolute humidity of water vapor, the radiation power decreases according to the exponential law.

3. Research results and discussion

3.1. Block diagram of a measuring device for controlling natural gas humidity. The conducted studies allowed the development of a measuring device for measuring the natural gas humidity (MDHGH) based on the microwave traveling wave method, the structural diagram of which is shown in Fig. 1. MDHGH is a two-channel and consists of a measuring channel and a comparison channel.

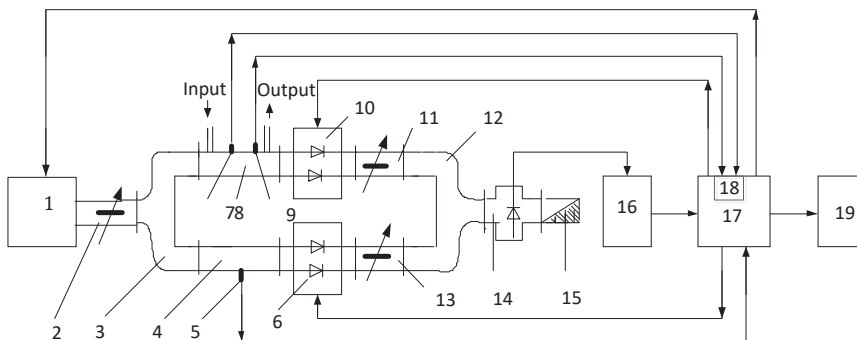


Fig. 1. Structural diagram of a measuring device for measuring the natural gas humidity

MDHGH consists of [5]:

- microwave generator 1,
- attenuator 2;
- waveguide tee 3;
- waveguide comparison section (comparative cuvette) 4;
- temperature sensor 5,
- switch comparative channel 6,
- pressure sensor measuring waveguide section 7;
- waveguide measuring section (measuring cell) 8;
- temperature sensor 9;
- switch measuring channel 10,
- attenuators of the measuring channel and the comparison channel 11 and 13, respectively;
- waveguide tee 12;
- diode section 14;
- agreed load 15;
- amplifier 16;
- microprocessor 17;
- analog-to-digital converter (ADC) 18;
- indications 19.

MDHGH microwave generator 1, assembled by a PIN diode (a kind of diode in which between the areas of electronic (n) and hole (p) conductivity there is an intrinsic semiconductor (i -region)), tunes to a frequency of 10 GHz with the help of a stabilized correction voltage, which arrives from the microprocessor 17. Let's denote the power of the high-frequency electromagnetic wave (HFEW), coming from the generator 1 through P_0 . The attenuator 2 attenuates the HFEW through passage by K_1 . The waveguide tee 3 divides the HFEW into two channels: the measuring channel and the comparison channel. HFEW power P_1 is divided by tee 3 into two channels equally. Let's denote the HFEW power of the measuring channel through P_m , and the HFEW power of the comparative channel through P_c .

So,

$$P_m = P_c = \frac{P_1}{2} = \frac{1}{2} K_1 \cdot P_0. \quad (1)$$

In addition, when HFEW passes through the waveguide sections of the tee, the power is weakened due to losses at the waveguide transitions associated with the waveguide material, its design features and manufacturing technologies.

3.2. Comparison channel study. In the comparison channel, there is a waveguide section of comparison 4 (comparison cell), which is filled with dry air at a pressure of 1 atm and a temperature of 20 °C. With these parameters, the comparison cell 4 is hermetically closed. When HFEW passes through the waveguide section of the comparison cuvette, its power is weakened due to the loss on the waveguide section of the comparison cuvette and losses associated with the HFEW passage through the layer of dry air in the comparison cuvette.

In the moisture measurement transformation, based on the use of the traveling waveguide microwave method, the attenuation is measured, which occurs when the HFEW passes through the gas medium depending on its dielectric constant according to [5, 6] $K_4 = e^{-aL}$, then the HFEW power at the output of the comparison cuvette:

$$P_2 = K_3 \cdot K_4 \cdot P_c = \frac{1}{2} K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot P_0 \cdot e^{-aL}, \quad (2)$$

where K_2 – the loss coefficient associated with the passage of the waveguide section of the waveguide tee; K_3 – loss coefficient associated with the HFEW passage through the waveguide section of comparison cell 4 in a vacuum state; a – the attenuation coefficient of dry air; L – the length of the comparison cell.

At the signal of the microprocessor 17, the switch comparative channel 6 opens and the HFEW passes to the input of the attenuator 13. When the HFEW passes through the waveguide section of the switch 6, its power P_2 is attenuated by the amount K_5 , and when passing through the waveguide attenuator section 13, by the amount K_6 . Similarly, let's denote the loss coefficient during the passage of HFEW through the branch of the waveguide tee 12 in K_7 .

The diode in the waveguide section 14 converts the energy of the variable HFEW into direct current I_d , the value of which is proportional to the power of the signal supplied to the input of the wave diode section 14. Let's denote the conversion coefficient of the diode section K_8 . Then $I_d = K_8 \cdot P_3$, the I_d current is supplied to the amplifier 16, at the input of which there is a resistance R – the coordinated load 15. The resistance R turns the I_d diode current into a voltage U , which is amplified by the amplifier 16. The current conversion coefficient of the I_d diode to voltage U and the conversion coefficient of amplifier 16 will be designated as K_9 and K_{10} , respectively. Then the voltage U_c of the comparison channel at the output of the amplifier 16 is equal to:

$$\begin{aligned} U_c &= K_9 \cdot K_{10} \cdot I_d = \\ &= \frac{1}{2} K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8 \cdot K_9 \cdot K_{10} \cdot P_0 \cdot e^{-aL}. \end{aligned} \quad (3)$$

The U_c signal is stored by the microprocessor 17.

3.3. Analysis of the attenuation coefficient a . Due to the fact that when HFEW passes through the layer of the gas under investigation, its attenuation directly depends on the properties of the dielectric constant of the gas, it is necessary to consider the effect of the dielectric constant on the MDHGH operation. The dielectric constant of gases depends on temperature. In [7], a formula is given for adjusting the dielectric constant depending on changes in pressure p and temperature T (in degrees Kelvin scale) of the medium under study. The dielectric constant of dry air is $\epsilon' - 1 = 0.00058$, and $\epsilon'' - 1 = 0.000058$ [8]. Attenuation coefficient according to [6]:

$$a = \frac{2\pi \cdot K_d}{\lambda} = K_d \cdot Z, \quad (4)$$

where K_d – the attenuation coefficient of dry air, $K_d = f(\epsilon_d)$ [9]; λ – the wavelength that the microwave generator 1 emits, $\lambda = 0.03$ m; $Z = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda}$.

The attenuation coefficient K_d of dry air will vary depending on the temperature in reference cell 4:

$$K_{dt} = K_d - K_{t1} \cdot t, \quad (5)$$

where K_{ct} – the temperature indicator of the attenuation of dry air (takes into account the deviation of the gas temperature in the comparison cell 4 other than 0 °C); K_{t1} – temperature correction coefficient, for dry air $K_{t1} = 0.00000215$ [4]; t – the dry air temperature in the comparison cell (in degrees Celsius).

Accordingly (3) will take the form:

$$U_c = \frac{1}{2} K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8 \cdot K_9 \cdot K_{10} \cdot P_0 \cdot e^{-(K_d - K_{t1} \cdot t)Z}. \quad (6)$$

3.4. Channel measurement. Let's consider the operation of the MDHGH measuring channel in the case of filling the measuring cell 8 with an air mixture (hereinafter air), which corresponds to the density and permittivity of natural gas, at a pressure of 1 atm [9]. In this case, the dry air temperature in the comparative cell 4 and the temperature of the controlled air in the measuring cell 8 will be equal.

Indoor air mainly consists of the sum of the attenuation of dry air and water vapor. Therefore, the rate of attenuation of controlled air $K_c = K_d + K_w$, where K_w – is the rate of attenuation of water vapor equal to:

$$K_w = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot 273.15}{760 \cdot T} \cdot \frac{\rho_{v,n}}{\rho_v} \cdot \left(\sqrt{(\epsilon'_1 - 1)^2 + (\epsilon''_1 - 1)^2} - (\epsilon''_1 - 1) \right)}, \quad (7)$$

where $\rho_{v,n}$ – absolute humidity of water vapor; ρ_v – water density.

The dielectric constant of water vapor at a temperature of 20 °C is $\epsilon' - 1 = 0.0000619$ and $\epsilon'' - 1 = 0.0000314$ [4]. It also depends on temperature.

Similarly to (5) and in accordance with [7], let's make adjustments to the dielectric constant of water vapor depending on the temperature of the controlled air inside the measuring cell 8. The rate of attenuation of dry air, taking into account the temperature adjustment, is known and equal to K_{ct} . Therefore, the attenuation rate of con-

trolled air, taking into account the temperature correction K_{tc} , will be:

$$K_{tc} = (K_w - K_{t2} \cdot t) + (K_d - K_{t1} \cdot t), \quad (8)$$

where K_{t2} – temperature correction coefficient, for water vapor $K_{t2} = 0.0000036825$; $K_{t1} = 0.0000036825$; t – a numerical indicator of temperature in a measuring cell (in degrees Celsius).

Then, by analogy with the operation of comparison channel 4, provided that the design and technological parameters of comparison cell 4 and measuring cell 8, waveguide switches 6 and 10 of the attenuators 11 and 13 are equal, let's obtain:

$$U_m = \frac{1}{2} K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8 \cdot K_9 \cdot K_{10} \cdot P_0 \cdot e^{-K_{tc} \cdot Z}. \quad (9)$$

The signal U_m is also remembered by the microprocessor 17.

3.5. The mathematical model of the device. When the process of memorizing signals U_m and U_c has passed, the microprocessor 17 performs the operation of dividing these signals. The quotient of the division of signals U_m and U_c , taking into account the conversion coefficient K_{11} , is stored by the microprocessor 17, after which it carries out the logarithm operation. The voltage U_m and U_c is supplied to the analog input of the microprocessor 17, where the ADC 18 with a conversion factor K_{12} is converted to a digital signal N. Then the mathematical model of the device can be written as:

$$\begin{cases} \ln\left(\frac{U_c}{U_m}\right) = \left(\ln K_{11} + \frac{2\pi \cdot L}{\lambda} \cdot (K_w - K_{t2} \cdot t) \right) \cdot K_{cal}, \\ N_1 = \frac{K_{12} \cdot U_m}{U_{op}} \cdot (2^{n_0} - 1), \\ N_2 = \frac{K_{12} \cdot U_c}{U_{op}} \cdot (2^{n_0} - 1), \end{cases} \quad (10)$$

where N_1 – the binary value of the code of the n -bit ADC, which is digitized the voltage U_m of the measuring channel; N_2 – binary value of the code of the n -bit ADC, digitizes the voltage U_m of the comparative channel; K_{cal} – the conversion coefficient associated with the MDHGH calibration.

MDHGH study is conducted. Natural gas consists of 98–99 % methane [10, 11]. The dielectric constant of dry methane is $\epsilon'_m = 1.000953$ at 0 °C [7]. Dry air is pumped into comparison cuvette 4. The dielectric constant of dry air is $\epsilon'_c = 1.0006258$ at 0 °C [7]. It is established that the relative error Δt in the absence of temperature adjustment and when the air temperature changes from 0 °C to 1 °C and – 1 °C leads to an error of ± 0.18 %. The values of the correction factors and the relative error in their application are also calculated. It is found that a change in gas temperature relative to 0 °C by 1 °C and – 1 °C leads to errors of 0.001 % and 0.000625 %, respectively.

4. Conclusions

A means of measuring control of the humidity of natural gas is proposed, the principle of which is based on the microwave method for measuring the humidity of natural gas, in which, in contrast to the known methods, the use of a traveling wave in a waveguide is proposed. In this

case, changes in the dielectric properties of gases during their interaction with microwave waves are estimated.

A mathematical model of the proposed means for measuring the humidity of natural gas has been developed, which takes into account the value of the dielectric constant of the measuring gas and the comparison channel, and contains temperature correction factors, the use of which improves the accuracy of humidity measurement.

A study of the measuring channel, the comparison channel, the attenuation coefficient is made, on the basis of which temperature humidity measurements are corrected. The influence of temperature correction factors on the error in measuring humidity is analyzed. Based on the analysis, it can be concluded that the use of these coefficients makes it possible to compensate with high accuracy the difference in the permittivity of dry methane and dry air. The error in this case when the temperature changes from 0 °C to 10 °C does not exceed 0.01 %.

References

1. Korotcenkov, G. (2018) *Handbook of Humidity Measurement, Volume 1: Spectroscopic Methods of Humidity Measurement*. CRC Press Published, 372. doi: <http://doi.org/10.1201/b22369>
2. Krause, K. M., van Popta, A., Steele, J. J., Sit, J. C., Brett, M. J. (2007). Microstructured humidity sensors fabricated by glancing angle deposition: characterization and performance evaluation. *Device and Process Technologies for Microelectronics, MEMS, Photonics, and Nanotechnology IV*. doi: <http://doi.org/10.1117/12.759533>
3. Wang, J., Zhang, H., Cao, Z., Zhang, X., Yin, C., Li, K. et. al. (2016). Humidity sensor base on the ZnO nanorods and fiber modal interferometer. *8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Design, Manufacturing, and Testing of Micro- and Nano-Optical Devices and Systems; and Smart Structures and Materials*. doi: <http://doi.org/10.1117/12.2244482>
4. Luo, S., Yang, L., Liu, J. (2020). Statistical characteristics analysis of global specific humidity vertical profile. *2019 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems*. doi: <http://doi.org/10.1117/12.2544132>
5. Bilynsky, Y. Y., Horodetska, O. S., Novytskyi, D. V. (2019). Development of Mathematical Model of Two-channel Microwave Measuring Converter of the Humidity of Natural Gas. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 145 (4), 19–24. doi: <http://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-145-4-19-24>
6. Bilenko, D. I. (1999) *Kompleksnaia dielektricheskaia pronitsaemost. Plazmennyy rezonans svobodnykh nositelei zariada v poluprovodnikakh*. Izd-vo Sarat. uni-ta, 44.
7. Brandt, A. A. (1963). *Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh*. Moscow: Fizmatgiz, 404.
8. Iakovlev, K. P.; Iakovlev, K. P. (Ed.) (1960). *Kratkii fiziko-tehnicheskii spravochnik*. Moscow: Fizmatgiz, 446.
9. Bilynsky, Y. Y., Horodetska, O. S., Novytskyi, D. V. (2019). Development of a mathematical model of the waveguide microwave measuring conversion the humidity of natural gas. *Visnyk KhNU. Tekhnichni nauky*, 3, 131–137.
10. Zyska, T., Bilinsky, Y., Saldan, Y., Ogorodnik, K., Lazarev, A., Horodetska, O., Mussabekova, A. (2018). New ultrasound approaches to measuring material parameters. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*. doi: <http://doi.org/10.1117/12.2501637>
11. Chen, Z., Lu, C. (2005). Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*, 3 (4), 274–295. doi: <http://doi.org/10.1166/sl.2005.045>

Bilynsky Yosyp, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Department of Electronics and Nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9659-7221>

Horodetska Oksana, PhD, Assistant Professor, Department of Telecommunication Systems and Television, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, e-mail: horodecka.os@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6929-1123>

Novytskyi Dmytro, Postgraduate Student, Department of Electronics and Nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6033-406X>

Voytsekhovska Olena, PhD, Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, e-mail: vojcehovska.o.v@vntu.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8755-1574>