

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГЛАДИШЕВСЬКИЙ МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 681.12

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОД І УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЗАСІБ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ
ВИТРАТ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу
речовин
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М. В. Гладишевський
(підпис)

Науковий керівник:
Білинський Йосип Йосипович,
доктор технічних наук,
професор

Вінниця - 2018

АНОТАЦІЯ

Гладишевський М. В. Метод і ультразвуковий засіб вимірювального контролю витрат плинних середовищ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2018.

Робота присвячена розв'язанню важливої науково-практичної задачі підвищення точності та вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ на основі використання ультразвукового амплітудно-частотного методу.

Основною проблемою комерційних відносин при поставках енергоносіїв як плинного середовища є дисбаланс, що виникає при фізичному обліку від постачальника до споживача, тобто в результаті транспортування. Загальними факторами, що визначають виникнення цього дисбалансу, є похибки у вимірюванні об'єму речовини, відсутність достовірного обліку через невисоку точність і обмежений діапазон лічильників, несправності вузлів обліку.

На сьогодні одними з найбільш прогресивних засобів вимірювального контролю витрати рідин і газів є витратоміри з ультразвуковими первинними перетворювачами.

Метою роботи є підвищення вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ у трубопроводах із малим поперечним перерізом шляхом використання амплітудно-частотної модуляції ультразвукового вимірювального перетворювача.

В роботі проаналізовано сучасний стан методів та засобів вимірювального контролю витрат плинних середовищ, виявлено їх переваги та недоліки. Запропоновано математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі, ультразвуковий амплітудно-частотний метод вимірювання швидкості потоку, який полягає у визначенні резонансної частоти ультразвукової хвилі. Розроблено математичну модель ультразвукового вимірювального перетворювача

швидкості плинних середовищ, засіб вимірювального контролю витрат природного газу, який може бути застосований в газопроводах невеликого перерізу. Проведено аналіз результатів експериментальних досліджень засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, отримано аналітичні залежності статичних метрологічних характеристик та оцінено впливні величини на вимірювальний канал засобу контролю.

Наукова новизна полягає в подальшому розвитку методу та ультразвукового засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, що дозволяє в промислових умовах у реальному часі забезпечити високу вірогідність контролю.

В роботі отримано ряд наукових результатів, серед яких удосконалено математичну модель перенесення ультразвукової хвилі в плинному середовищі в межах ближньої зони ультразвукових передавача-приймача, яка адекватно описує фізичні процеси та в якій, на відміну від відомих, амплітудно-частотна характеристика однозначно пов'язана зі швидкістю потоку, при цьому враховано вплив густини ρ середовища, його температуру T , а також показник адіабати χ та коефіцієнт стисливості газу K . Отримав подальшого розвитку ультразвуковий метод вимірювального контролю витрат плинних середовищ у трубопроводах із малим поперечним перерізом на основі використання амплітудно-частотної модуляції, який, на відміну від відомого, базується на явищі інтерференції ультразвукових хвиль в ближній зоні передавача-приймача, а результатом вимірювального контролю є значення резонансної частоти, а отже, швидкості потоку та об'ємної витрати, при цьому встановлено, що похибка вимірювання не перевищує 1%. Вперше запропоновано математичну модель ультразвукового амплітудно-частотного засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, яка враховує геометричні розміри трубопроводу й ультразвукових перетворювачів та швидкості поширення ультразвукової хвилі, отримано функцію перетворення, що однозначно пов'язує вихідну величину – значення резонансної частоти ультразвукового сигналу та вхідну – значення витрат плинного середовища. Експериментально доведено, що засоби, які реалізують цей метод, характеризуються високою вірогідністю контролю (0,95–0,96). Практичне

значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено та впроваджено експериментальний зразок ультразвукового витратоміра, який відрізняється тим, що для підвищення вірогідності використано один канал прийому передачі сигналу за або проти потоку та амплітудно-частотну схему модуляції. В результаті метрологічних досліджень експериментального витратоміра встановлено, що засіб дозволяє вимірювати швидкість газового плинного середовища в діапазоні 0,25 – 25 м/с, що відповідає високому рівню вимірювального контролю, максимальна зведена похибка засобу контролю витрати не перевищує 1%. Розроблено програмне забезпечення ультразвукового витратоміра та методику підвищення точності вимірювального контролю, що дає змогу визначити резонансну частоту, а отже, швидкість потоку при низьких апаратних затратах. Експериментально досліджено закони розподілу контрольованих величин і похибки вимірювання. Доведено, що ці закони є нормальними. Встановлено, що засіб контролю, який реалізує ультразвуковий амплітудно-частотний метод, забезпечує вірогідність контролю витрати природного газу в межах 0,95–0,96. Такий результат є вищим порівняно з засобами, що реалізують часово-імпульсний або частотний методи. Розроблено методику проектування ультразвукового амплітудно-частотного витратоміра, який складається з трьох основних частин: первинного вимірювального перетворювача, блока обробки сигналів і алгоритму автоматичного вимірювання. За цією методикою розроблено електричну принципову схему аналогового блока, сумісного з первинним вимірювальним перетворювачем, та виготовлено експериментальний зразок засобу.

Результати лабораторних і метрологічних досліджень дозволили вважати розроблений засіб контролю витрат плинних середовищ типовим засобом вимірювання, а результати промислових досліджень дозволили його практичне використання в складі системи неперервного контролю витрат природного газу.

Під час виконання роботи розв'язано важливу науково-практичну задачу підвищення точності та вірогідності вимірювального контролю витрат плинних

середовищ на основі використання ультразвукового амплітудно-частотного методу.

Таким чином, проаналізовано сучасний стан методів та засобів вимірювального контролю витрат плинних середовищ, виявлено їх переваги та недоліки. Обґрунтовано вибір найбільш перспективного та точного методу вимірювального контролю витрат. Таким методом є ультразвуковий, який, не зважаючи на недоліки, має безліч переваг над іншими, а саме: безінерційність та безконтактність вимірювання; відсутність рухомих частин в потоці та витрат тиску в трубопроводах; можливість їх застосування для вимірювання витрат забруднених і агресивних середовищ. Запропоновано математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі, яка описує поведінку сигналу в ближній зоні внаслідок зміни частоти та швидкості потоку. Встановлено, що на величину вихідного сигналу суттєво впливає густина плинного середовища, його температура, а для природного газу – показник адіабати та коефіцієнт стисливості газу. Запропоновано ультразвуковий амплітудно-частотний метод вимірювання швидкості потоку, який полягає у визначенні резонансної частоти ультразвукової хвилі, що однозначно пов'язана зі швидкістю плинного середовища, яка відповідає останньому дифракційному максимуму ближньої зони. Такий підхід дозволив зменшити зону нечутливості й тим самим підвищити точність і вірогідність вимірювального контролю та використати як засіб вимірювального контролю плинних середовищ в трубопроводах малого діаметра. Розроблено математичну модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ та проведено моделювання отриманої залежності, з якого видно, що напрямок потоку ніяк не впливає на залежність резонансної частоти ультразвукової хвилі від швидкості потоку. Отримано залежність зміни частоти ультразвукового сигналу від часу, за допомогою якого можна зробити висновок про досить високу швидкодію. Розроблено засіб вимірювального контролю витрат природного газу, який може бути застосований в газопроводах невеликого діаметра (від 25 мм) та в умовах різкої зміни швидкості потоку. Проведено моделювання цього засобу, в основу

якого покладено еквівалентну схему вимірювального перетворювача на основі смугового фільтра. Результати моделювання показали можливість використання запропонованого методу. Оцінено час реакції системи на зміну частоти генератора. Наведено алгоритм вимірювального контролю витрат. Проведено аналіз результатів експериментальних досліджень засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, який показав збіжність теоретичної та експериментальної характеристики. Похибка моделі не перевищує 10%. Наведено залежності загального закону розподілу похибки вимірювання швидкості потоку та встановлено, що закон розподілу є нормальним. Розраховано помилки першого $\alpha=0,035$ та другого роду $\beta=0,0028\div 0,0002$. Вірогідність прийняття засобом вимірювального контролю правильного результату становить 0,96, що на 1% вище, ніж у відомих засобів. Отримано аналітичні залежності статичних метрологічних характеристик та оцінено впливні величини на вимірювальний канал засобу контролю. Встановлено, що значення похибки вимірювань не перевищує 1%.

Ключові слова: частотно модульований сигнал, вимірювальний контроль, природний газ, витратоміри, методи вимірювання, ультразвуковий вимірювальний перетворювач, ультразвуковий амплітудно-частотний метод, амплітудно-частотний витратомір, ближня зона.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

- [1] Й. Й. Білинський, М. В. Гладішевський і Б. П. Книш, «Визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 112-119, 2014.
- [2] Й. Й. Білинський, М. В. Гладішевський і М. О. Стасюк, «Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ і класифікація на їх основі», *Наукові праці ВНТУ*, № 1, 2015, [Електронний ресурс]. Доступно: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3748/5468>.

- [3] Й. Й. Білинський, М. В. Гладишевський і О. С. Городецька, «Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідких і/або газоподібних середовищ», *98518 МПК G0FB 1/00 № U201413183*, Квіт. 27, 2015.
- [4] Й. Й. Білинський, М. В. Гладишевський і О. С. Городецька, «Ультразвуковий витратомір», *99227 МПК G0FB 1/00 № U201413183*, Трав. 25, 2015.
- [5] Й. Й. Білинський і М. В. Гладишевський, «Аналіз метрологічних характеристик засобів вимірювання об'єму та витрати плинних середовищ», на *Всеукраїнському семінар-наradі. Облік природного газу та метрологія*, Козин, 2016, с. 13-15.
- [6] Й. Й. Білинський і М. В. Гладишевський, «Аналіз ультразвукових засобів вимірювального контролю витрати плинних середовищ», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 23-29, 2016.
- [7] Й. Й. Білинський і М. В. Гладишевський, «Розробка ультразвукового методу вимірювання швидкості плинних середовищ», *Технологічний аудит та резерви виробництва*, № 4/1, с. 19-24, 2015.
- [8] Й. Й. Білинський і М. В. Гладишевський, «Новий ультразвуковий метод вимірювання витрат плинних середовищ», *Нафтогазова галузь України*, № 2, с. 35-39, 2016.
- [9] Й. Й. Білинський і М. В. Гладишевський, «Методика проектування амплітудно-частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку», на *XV Міжнародній науково-технічній конференції. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, Одеса, 2015, с. 37-39.
- [10] Й. Й. Білинський і М. В. Гладишевський, «Ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ», на *I Міжнародній науково-технічній конференції. Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015*, Житомир, 2015, с. 53-54.
- [11] М. В. Гладишевський, А. А. Рижкова і Д. О. Харламов, «Шляхи забезпечення єдності вимірювань на підприємствах», на *X Міжнародній науково-технічній конференції. АВІА-2011*, Київ, 2011, с. 71-74.

- [12] М. В. Гладішевський, «Аналіз системи вимірювання витрат газу», на *IX Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2009, с. 56.
- [13] В. С. Єременко і М. В. Гладішевський, «Сучасні прилади обліку витрат газу», на *X Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2010, с. 152.
- [14] В. С. Єременко і М. В. Гладішевський, «Методика обліку природного газу на базі ультразвукового лічильника», на *XI Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2011, с. 125.
- [15] Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Математична модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ», на *III Міжнародній науковій конференції. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах*, Вінниця, 2015, с. 128-129.
- [16] М. П. Андрієшин, М. В. Гладішевський, Р. А. Домницький, С. І. Дехтярчук і А. В. Едель, «Вплив фізико-хімічних показників газу на ефективність роботи газових приладів», *Нафтогазова галузь України*, № 6, с. 34-39, 2014.
- [17] Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Експериментальне дослідження підсилювача для ультразвукового витратоміра», на *Міжнародній науково-практичній конференції. Потенціал сучасної науки*, Вінниця, 2016, с. 21-23.
- [18] Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Моделювання роботи підсилювача для ультразвукового витратоміра», на *XIII Міжнародній конференції. Контроль та управління в складних системах (КУСС-2016)*, Вінниця, 2016, с. 71-73.
- [19] Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Алгоритм мікропроцесорної обробки вимірювання швидкості потоку», на *X Міжнародній науково-технічній конференції. Метрологія та вимірювальна техніка*, Харків, 2016, с. 94.
- [20] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і В. Б. Бурдейний, «Модель поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі», *Вісник НТУ*

«ХІІІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, № 42(1214), с. 17-21, 2016. Doi. 10.20998/2413-4295.2016.42.03.

- [21] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання ультразвукового амплітудно-частотного вимірювача швидкості плинних середовищ», *Методи та прилади контролю якості*, № 2(37), с. 67-71, 2016.
- [22] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання ультразвукового засобу вимірювального контролю витрати плинних середовищ», *Вісник Хмельницького національного університету, Серія: Технічні науки*, № 1(245), с. 191-195, 2017.
- [23] Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ», на *Всеукраїнському семінар-наradі. Облік природного газу та метрологія*, Рівне, 2015, с. 13-14.
- [24] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський, О. С. Городецька і Я. В. Яхимович, «Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідких і/або газоподібних середовищ», *121664 МПК G01F 1/66 № U201706593*, Груд. 11, 2017.
- [25] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський, К. В. Огородник і А. В. Столяр, «Спосіб визначення густини газу», *115995 МПК G01F 1/66 № U201608719*, Травень. 10, 2017.9
- [26] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський, О. С. Городецька і Я. В. Яхимович, «Дослідження частотної характеристики ультразвукового сигналу в системі приймач-передавач в межах ближньої зони», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2017)»*, Вінниця, 2017, с. 23–24.
- [27] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський, О. С. Городецька і Я. В. Яхимович, «Дослідження явища інтерференції ультразвукового сигналу в межах ближньої зони», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2017)»*, Вінниця, 2017, с. 25–26.

ABSTRACT

Gladyshevskiy M.V. Method and ultrasonic mean of measurement control for flowing medium flowrate. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.11.13 "Instruments and methods of control and determination of substance composition". – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsya, 2018.

The thesis paper is concerned with solving an important scientific and practical task of increasing the accuracy and probability of flowing medium flow rate measuring control based on the use of ultrasonic amplitude-frequency method.

The main problem of commercial relations in the energy supply as a fluid medium is the imbalance that occurs during real measurement from the supplier to the consumer, that is, while of its transportation. The general factors determining the occurrence of this imbalance are the errors in measuring the volume of the substance, the lack of reliable measurement due to low accuracy and limited range of meters, malfunction of metering stations.

As of today, one of the most progressive means of measurement control for gases and liquids flowrate is the flowmeters with ultrasonic primary transducers.

The aim of the work is to increase the probability of measurement control for flowing medium flowrate in the conduits with small cross-sections using the amplitude-frequency modulation of an ultrasonic measuring transducer.

In the work the current state of methods and means of measuring control of flowing medium flow rates were analyzed, their advantages and disadvantages were identified. Proposed the mathematical model of the ultrasonic wave propagation in a flowing medium, ultrasonic amplitude-frequency method for flow velocity measurement, which consists in determining the resonance frequency of an ultrasonic wave. Developed the mathematical model of the ultrasonic measuring transducer for flowing medium velocity, an instrumentation and control device for natural gas flow rate, which can be applied for small diameter gas pipelines. The analysis of the experimental studies results of the means of measuring control for flowing medium flow rate has been carried out, the analytical dependences of static metrological characteristics have been obtained, and the

influence values on the measuring channel of the means of measuring control have been estimated.

The scientific novelty of the study is the further development of the method and ultrasonic means of measurement control for flowing medium flowrate, which allows real-time industrial conditions to provide high probability of control.

A number of scientific results were obtained, among which a mathematical model improvement for the ultrasonic wave propagation in a flowing medium within the near zone of an ultrasonic transmitter-receiver, which adequately describes physical processes and in which, unlike the known, the amplitude-frequency characteristic is unambiguously related to the flow velocity, taking into account the influence of the density ρ of the medium, its temperature T , as well as the adiabatic index χ and the compressibility coefficient of gas K . The ultrasonic measurement method was further developed for measurement control of flowing medium flowrate in conduits with small cross-sections based on the use of amplitude-frequency modulation, which, unlike the known, is based on the phenomenon of interference of ultrasonic waves in the near zone of the transmitter-receiver, and the result of the measurement control is the value of the resonant frequency, and therefore the flow velocity and volumetric flowrate, thus it is established that the measurement error does not exceed 1%. For the first time a mathematical model of the ultrasonic amplitude-frequency mean of measurement control for flowing medium flowrate is proposed, which takes into account the geometric dimensions of the pipeline and ultrasonic transducers and the velocity of the ultrasonic wave, a transformation function is obtained that uniquely binds the output value - the value of the resonant frequency of the ultrasonic signal and the input value – the value of the fluid flowrate. It has been experimentally proved that the means that implement this method are characterized by high probability of measurement control (0,95-0,96). The practical significance of the obtained results is that based on theoretical and experimental researches, an experimental sample of an ultrasonic flowmeter was developed and implemented, which is characterized by the fact that one channel is used for receiving-transmitting the signal upstream or downstream the flow and the amplitude-frequency modulation scheme are used to increase the probability of measurement control. As a

result of the metrological research of the experimental flow meter, it was determined that the instrument allows to measure the speed of the gas flowing medium in the range of 0.25 – 25 m/s, which corresponds to the high level of measurement control, the maximum combined error of the mean of measurement control of the flowrate does not exceed 1%. The software of the ultrasonic flowmeter and the method for increasing the precision of the measurement control, which makes it possible to determine the resonant frequency, and therefore the flow rate at low hardware costs, is developed. The laws of the distribution of controlled quantities and measurement errors have been experimentally investigated. It is proved that these laws are normal. It was established that the control mean that implements the ultrasonic amplitude-frequency method provides the probability of measurement control of natural gas flowrate is within the range of 0.95-0.96. This result is better to those means that implement the transit-time or frequency method. The method of designing an ultrasonic amplitude-frequency flowmeter is developed, which consists of three main parts: a primary measuring transducer, a signal-processing unit and an automatic measurement algorithm. According to this technique, an electric principle diagram of the analog block compatible with the primary measuring transducer was developed and an experimental sample of the mean was developed.

The results of laboratory and metrological studies allowed to consider developed mean of measurement control for flowing medium flowrate as a typical measuring instrument, and the results of industrial research allowed its practical use as a part of the system for continuous monitoring of natural gas consumption.

As a result, an important scientific and practical task of increasing the accuracy and probability of measurement control for flowing medium flowrate based on ultrasonic amplitude-frequency method was solved.

Thus, the present state of methods and means of measurement control for flowing medium flowrate is analyzed, their advantages and disadvantages are revealed. The choice of the most perspective and accurate method for measurement control of flowrate is substantiated. Such method is ultrasonic method, which despite disadvantages has many advantages over other methods, such as: zero lag and contactless of measurement; the absence of moving parts in the flow and pressure losses in the pipelines; the ability

to use them to measure the flowrate of contaminated and aggressive environments. The mathematical model of the ultrasonic wave propagation in a fluid medium is proposed, which describes the behavior of the signal in the near zone due to changes in the frequency and flow velocity. It is established that the density of the flowing medium, its temperature, significantly influences the magnitude of the output signal and for natural gas the adiabatic index and the compressibility factor of gas. An ultrasonic amplitude-frequency method for measuring the flow velocity is proposed, which consists in determining the resonance frequency of an ultrasonic wave, that is uniquely associated with the velocity of the flowing medium, which corresponds to the last diffractive maximum of the near zone. This approach has allowed to reduce the zone of insensitivity and thereby to increase the accuracy and probability of measurement control of flowing medium and use it as a mean of measurement control for flowing medium flowrate in conduits with small cross-section. The mathematical model of the ultrasonic measuring transducer of the flowing medium velocity was developed and the obtained dependency was simulated, from which it is evident that the dependence of the resonance frequency of the ultrasonic wave on the flow velocity does not depend on the flow direction. The dependence of the change in the frequency of the ultrasonic signal from time is obtained, that is results in high response speed. The device for measurement control of natural gas flowrate was developed, which can be applied in gas pipelines with small diameter (from 25 mm) and in conditions of sharp change of flowrate. The simulation of this device was carried out, based on the equivalent scheme of the measuring transducer with the bandpass filter. The simulation results showed the adequacy the proposed method. The reaction time of the system on the frequency change of the generator was estimated. The algorithm of measurement control of flowrate is given. The analysis results of experimental studies of the mean of measurement control for flowing medium flowrate has been carried out, which showed the convergence of theoretical and experimental characteristics. Model error does not exceed 10%. The dependences of the general law of the distribution of the measurement error of the flow velocity measurement are given and it is established that the distribution law is normal. The errors of the first $\alpha = 0.035$ and the second kind $\beta = 0.0028 \div 0.0002$ were calculated. The probability of

acceptance by mean of measurement control of the correct result is 0.96, which is 1% higher than that of known means. The analytical dependences of static metrological characteristics were obtained and the influence values on the measurement channel of the control instrument were estimated. It has been established that the measurement error value does not exceed 1%.

Keywords: frequency modulated signal, measurement control, natural gas, flow meters, measurement methods, ultrasonic measuring transducer, ultrasonic amplitude-frequency method, amplitude-frequency flow meter, near zone.

ЗМІСТ

ВСТУП..... 18

**РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ВИТРАТ
ПЛИННИХ ТА ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ І КЛАСИФІКАЦІЯ НА ЇХ
ОСНОВІ.....Error! Bookmark not defined.**

1.1 Класифікація методів витрат плинних середовищ..... **Error! Bookmark not defined.**

1.2 Аналіз ультразвукових засобів вимірювального контролю витрати плинних середовищ.....**Error! Bookmark not defined.**

1.3 Вибір критерію оцінювання ефективності вимірювальних перетворювачів**Error! Bookmark not defined.**

Висновки до розділу 1.....Error! Bookmark not defined.

**РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ НА ОСНОВІ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУError! Bookmark not defined.**

2.1 Дослідження об'єкта контролю**Error! Bookmark not defined.**

2.2 Модель поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі **Error! Bookmark not defined.**

2.3 Розробка ультразвукового амплітудно-частотного методу вимірювального контролю плинних середовищ та його експериментальні дослідження **Error! Bookmark not defined.**

2.4 Розробка математичної моделі ультразвукового амплітудно-частотного вимірювального перетворювача витрат плинних середовищ **Error! Bookmark not defined.**

Висновки до розділу 2.....Error! Bookmark not defined.

**РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ
ВИТРАТ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ НА ОСНОВІ АМПЛІТУДНО-
ЧАСТОТНОГО МЕТОДУError! Bookmark not defined.**

3.1 Розробка засобу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу та виведення функції перетворення засобу вимірювального контролю**Error! Bookmark not defined.**

3.1.1 Еквівалентна схема вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.2 Моделювання роботи основних блоків вимірювального перетворювача	Error! Bookmark not defined.
3.1.3 Розробка алгоритму мікропроцесорної обробки результатів вимірювального контролю плинних середовищ	Error! Bookmark not defined.
3.2 Підвищення вірогідності вимірювального контролю амплітудно-частотного засобу вимірювання витрат плинних середовищ....	Error! Bookmark not defined.
3.3 Аналіз похибок засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ.....	Error! Bookmark not defined.
3.4 Складова похибки квантування (похибка АЦП).....	Error! Bookmark not defined.
Висновки до розділу 3	Error! Bookmark not defined.

РОЗДІЛ 4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ	Error! Bookmark not defined.
--	-------------------------------------

4.1 Рекомендації щодо інженерного проектування засобу вимірювального контролю плинних середовищ	Error! Bookmark not defined.
4.2 Алгоритм вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу	Error! Bookmark not defined.
4.3 Оцінювання загальної похибки вимірювання швидкості плинного середовища.....	Error! Bookmark not defined.
4.4 Оцінювання вірогідності контролю швидкості плинного середовища	Error! Bookmark not defined.
Висновки до розділу 4	Error! Bookmark not defined.
Висновки	Error! Bookmark not defined.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 26

Додаток А Акти впровадження дисертаційної роботи у виробництвоError!

Bookmark not defined.

Додаток Б Акт впровадження дисертаційної роботи у навчальний процес

.....Error! Bookmark not defined.

Додаток В Моделювання процесу формування стоячої хвилі ... Error! Bookmark

not defined.

Додаток Д Модель поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі

.....Error! Bookmark not defined.

Додаток Е Залежність частоти ультразвукової хвилі від швидкості потоку

.....Error! Bookmark not defined.

Додаток Ж Математична модель витратоміраError! Bookmark not defined.

Додаток И Розрахунок сумісного закону розподілу похибок Error! Bookmark not

defined.

Додаток К Дослідження вірогідності контролю швидкості потокуError!

Bookmark not defined.

Додаток Л Експериментальні дані залежності резонансної частоти від витрат

плинного середовища, отримані з використанням експериментальної

установкиError! Bookmark not defined.

Додаток М Теоретична та експериментальна характеристики витратоміра

.....Error! Bookmark not defined.

Додаток Н Дослідження законів розподілу контрольованої величиниError!

Bookmark not defined.

Додаток П Список публікацій здобувачаError! Bookmark not defined.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

В умовах ринкової економіки енергетична безпека України має бути побудована на ефективному використанні енергетичних ресурсів, скороченні їх споживання та зменшенні втрат, підвищенні точності і вірогідності їх обліку. Це стосується, насамперед, таких вуглеводневих енергоносіїв як нафтопродукти та природний газ. Основною проблемою комерційних відносин при поставках енергоносіїв як плинного середовища є дисбаланс, що виникає при фізичному обліку від постачальника до споживача, тобто в результаті транспортування. Загальними факторами, що визначають виникнення цього дисбалансу, є похибки у вимірюванні об'єму речовини, відсутність достовірного обліку через невисоку точність і обмежений діапазон лічильників, несправності вузлів обліку [1].

Проблемам підвищення точності та вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ присвячено наукові праці багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених, зокрема І. С. Бродіна, Є. П. Пістуна, О. Є. Середюка, І. С. Петришина, С. А. Чеховського, О. М. Дерев'ягіна, П. П. Кремльовського, В. І. Свистуна, А. А. Тупіченкова, Є. Т. Володарського, В. С. Осадчука, А. С. Фоміна, М. А. Данілова (Росія), М. Ван дер Беека (Нідерланди), Р. Крамера, Д. Допхайде (Німеччина), Г. Маттінглі, А. Джонсона (США) та ін.

На сьогодні одними з найбільш прогресивних засобів вимірювального контролю витрати рідин і газів є витратоміри з ультразвуковими первинними перетворювачами. Частка ультразвукових витратомірів на світовому ринку серед усіх засобів контролю витрат різних енергоносіїв становить більше 10%. [2]

Ультразвукові витратоміри мають ряд важливих переваг [3]:

- широкий динамічний діапазон вимірювань;
- відсутність втрат напору завдяки відсутності елементів приладу в вимірювальному каналі;
- відсутність впливу на гідродинаміку потоку;
- відсутність рухомих елементів і, як наслідок, підвищена надійність;

- можливість вимірювання витрати нафтопродуктів, агресивних, неелектропровідних, непрозорих неоднорідних рідин суспензій, зокрема, багатокомпонентних середовищ;
- низьке енергоспоживання;
- можливість монтажу без зупинення технологічного процесу (для накладних приладів);
- збереження техніко-експлуатаційних характеристик у часі;
- відносна похибка таких засобів, як правило, знаходиться в межах 1%-1,5%.

Ультразвукові витратоміри поділяють, як правило, на три основні групи за методом вимірювання швидкості газового потоку [1].

Це витратоміри, основані на принципі переміщення ультразвукових коливань рухомим газовим потоком за та проти потоку (transit time flowmeters). До них відносяться фазові, часово-імпульсні, частотні та кореляційні.

До другої групи відносяться ультразвукові витратоміри, основані на явищі Доплера (Doppler flowmeters), до третьої – довгохвильові витратоміри, які застосовують хвилі зі звукового діапазону частот.

На сьогодні найбільш перспективними засобами контролю та обліку витрати плинних середовищ є ультразвукові часово-імпульсні витратоміри з діаметральними акустичними каналами [2].

Разом з тим, аналіз конструктивних особливостей і технічних характеристик відомих ультразвукових витратомірів показує, що проблеми створення досить надійно працюючих перетворювачів витрати вирішені далеко не повністю. Кожен з наведених вище типів витратомірів має свої недоліки, основними з яких є, зокрема, необхідність забезпечити надійне визначення витрати в «забруднених» газових середовищах, а також в моменти виникнення різкої зміни швидкості потоку в трубопроводі, яка призводить до зміни виду потоку; низька точність реєстрації положення початку імпульсного сигналу; дискретність вимірювань, складність обробки сигналу. Окрім того, часово-імпульсні чи частотні витратоміри застосовують, як правило, для вимірювання витрат у трубопроводах

великого діаметра. А в трубопроводах малого діаметра або в хордових каналах вони мають досить велику зону нечутливості. Тому й відсутні ультразвукові витратоміри з діаметром трубопроводу менше 25 мм, оскільки ускладнюється конструкція, а вартість не задовольняє користувача.

В цілому, всі виробники ультразвукових витратомірів використовують однаковий підхід в галузі вимірювання витрати газу і мають незначні відмінності в моделі побудови таких витратомірів та кінцевому результату обробки отриманих даних. Така одноманітність спонукає до більш глибокого дослідження ультразвукових методів вимірювання задля усунення спільних проблем шляхом впровадження нових методів ультразвукових вимірювань. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що з огляду на безупинний розвиток промисловості та високі вимоги до вимірювального обладнання залишається актуальним завдання розробки сучасних методів і засобів акустичного контролю плинних середовищ, зокрема для малого діаметра трубопроводу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи становлять результати досліджень, які проводились протягом 2014–2017 р. за планами наукових робіт кафедри електроніки та наносистем ВНТУ та ТОВ НВФ «Робікон». Основні результати дисертаційної роботи отримані під час виконання автором госп. договірної теми «Розробка методики проектування ультразвукового витратоміра природного газу» (№ держ. реєстрації 0115U000823), держбюджетної теми «Засоби контролю кількісного вмісту та витрат природного та скрапленого нафтового газів» (№ держ. реєстрації 0116U0004707, виконавець, 2016, 2017 рр.), яка проводилась на кафедрі електроніки та наносистем ВНТУ.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ у трубопроводах із малим поперечним перерізом шляхом використання ультразвукового частотно модульованого сигналу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі.

– Проаналізувати існуючі методи та засоби вимірювального контролю витрат плинних середовищ.

– Обґрунтувати та експериментально дослідити метод вимірювання швидкості плинних середовищ, оснований на частотній модуляції ультразвукового сигналу.

– Удосконалити математичну модель перенесення ультразвукового випромінювання в плинному середовищі.

– Розробити та дослідити математичну модель ультразвукового вимірювального перетворювача плинних середовищ.

– Запропонувати математичну модель та розробити амплітудно-частотний засіб вимірювального контролю витрат плинних середовищ.

– Отримати аналітичні залежності для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик та впливних величин на вимірювальний канал засобу контролю витрат плинних середовищ.

– Виконати експериментальні дослідження засобу та оцінити вірогідність контролю.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії ультразвукового випромінювання з плинним середовищем.

Предметом дослідження є методи та засоби вимірювального контролю витрат плинних середовищ.

Методи дослідження. Під час виконання поставлених задач використовувались: основи теорії вимірювального перетворення неелектричних величин для розробки математичної моделі ультразвукового вимірювального перетворювача; методи математичного, фізичного та комп'ютерного моделювання з використанням середовищ MATHCAD, Matlab та Maple при дослідженні ультразвукового амплітудно-частотного методу та засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ; основи теорії ймовірності і випадкових процесів для дослідження вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ; методи математичної статистики при обробці результатів вимірювань під час дослідження повторюваності результату; основи теорії вимірювань і похибок для оцінювання метрологічних характеристик запропонованого засобу.

Наукова новизна отриманих результатів і положень, що виносяться на захист, полягає в подальшому розвитку методу та ультразвукового засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, який дозволяє в промислових умовах у реальному часі забезпечити високу вірогідність контролю.

В роботі отримано такі наукові результати.

1. Удосконалено математичну модель перенесення ультразвукової хвилі в плинному середовищі в межах ближньої зони ультразвукових передавача-приймача, яка адекватно описує фізичні процеси та в якій, на відміну від відомих, амплітудно-частотна характеристика однозначно пов'язана зі швидкістю потоку, при цьому враховано вплив густини ρ середовища, його температуру T , а також показник адіабати χ та коефіцієнт стисливості газу K .

2. Отримав подальшого розвитку ультразвуковий метод вимірювального контролю витрат плинних середовищ у трубопроводах із малим поперечним перерізом на основі частотної модуляції, який, на відміну від відомого, базується на явищі інтерференції ультразвукових хвиль в ближній зоні передавача-приймача, а результатом вимірювального контролю є значення резонансної частоти, а отже швидкості потоку та об'ємної витрати, при цьому встановлено, що похибка вимірювання не перевищує 1%.

3. Вперше запропоновано математичну модель ультразвукового амплітудно-частотного засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, яка враховує геометричні розміри трубопроводу й ультразвукових перетворювачів та швидкості поширення ультразвукової хвилі, отримано функцію перетворення, що однозначно пов'язує вихідну величину – значення резонансної частоти ультразвукового сигналу та вхідну – значення витрат плинного середовища; експериментально доведено, що засоби, які реалізують цей метод, характеризуються високою вірогідністю контролю (0,95–0,96).

Практичне значення отриманих результатів. Отримані наукові результати впроваджено у вигляді експериментального зразка ультразвукового витратоміра в ТОВ «НВФ «Робікон»» м. Київ (акт впровадження від 12.07.2017 р.), ПрАТ «Енергооблік» м. Харків (акт. впровадження від 08.11. 2017 р.) та у

навчальний процес кафедри електроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету.

1. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено та впроваджено експериментальний зразок ультразвукового витратоміра, який відрізняється тим, що для підвищення вірогідності вимірювального контролю використано частотно модульований сигнал. В результаті метрологічних досліджень експериментального витратоміра встановлено, що засіб дозволяє вимірювати швидкість газового плинного середовища в діапазоні 0,25 – 25 м/с, що забезпечує високу вірогідність контролю, максимальна зведена похибка засобу контролю витрати не перевищує 1%.

2. Розроблено програмне забезпечення ультразвукового витратоміра та методику підвищення точності вимірювального контролю, що дає змогу визначити резонансну частоту, а отже швидкість потоку при низьких апаратних затратах.

3. Експериментально досліджено закони розподілу контрольованих величин і похибки вимірювання. Доведено, що ці закони є нормальними. Встановлено, що засіб контролю, який реалізує ультразвуковий амплітудно-частотний метод, забезпечує вірогідність контролю витрати природного газу в межах 0,95–0,96. Такий результат є вищим порівняно з засобами, що реалізують часово-імпульсний або частотний методи.

4. Розроблено методику проектування ультразвукового амплітудно-частотного витратоміра, який складається з трьох основних частин: первинного вимірювального перетворювача, блока обробки сигналів і алгоритму автоматичного вимірювання. За цією методикою розроблено електричну принципову схему аналогового блока, сумісного з первинним вимірювальним перетворювачем, та виготовлено експериментальний зразок засобу.

Результати лабораторних і метрологічних досліджень дозволяють вважати розроблений засіб контролю витрат плинних середовищ типовим засобом вимірювання, а результати промислових досліджень дозволили його практичне

використання в складі системи неперервного контролю витрат природного газу. Впровадження підтверджуються відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу [4, 21], визначення впливу фізико-хімічних показників газу на ефективність роботи газових приладів [5], проаналізовано методи і засоби контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та запропоновано класифікацію на їх основі [6], проведено аналіз системи вимірювання витрат газу та розглянуто шляхи забезпечення єдності вимірювань [7, 22], аналіз методики обліку природного газу на базі ультразвукового лічильника [8], проаналізовано метрологічні характеристики засобів вимірювання об'єму та витрати плинних середовищ [9], проаналізовано ультразвукові засоби вимірювального контролю витрати плинних середовищ [10, 23], розроблено новий ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ [11], запропоновано новий ультразвуковий метод вимірювання витрат плинних середовищ [12, 24, 97], розроблено методику проектування амплітудно-частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку [13], розроблено математичну модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ [14], проведено експериментальне дослідження підсилювача для ультразвукового витратоміра [15], проведено моделювання роботи підсилювача для ультразвукового витратоміра [16], розроблено алгоритм мікропроцесорної обробки вимірювання швидкості потоку [17], подано модель поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі [18], проведено моделювання ультразвукового амплітудно-частотного вимірювача швидкості плинних середовищ [19], проведено моделювання ультразвукового засобу вимірювального контролю витрати плинних середовищ [20].

Апробація матеріалів дисертації. Результати досліджень, що розглядаються у цій роботі, пройшли апробацію на таких науково-технічних конференціях: IX–XXI міжнародні науково-практичні конференції «Політ.

Сучасні проблеми науки» (м. Київ, 2009-2011 рр.); 7-ма міжнародна науково-технічна конференція і виставка «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 25 – 28 листопада 2014 р); Всеукраїнська семінар-нарада «Облік природного газу та метрологія» (сmt. Козин, 23–27 травня 2016); XV міжнародна науково-технічна конференція «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (м. Одеса (Затока), 10–14 вересня 2015); I всеукраїнська науково-технічна конференція «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015» (м. Житомир, 17–18 квітня 2015); Х міжнародна науково-технічна конференції «АВІА-2011». (м. Київ, 19–21 квітня 2011); III міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах». (м. Вінниця, 27–29 жовтня 2015); XIII Міжнародна конференція «Контроль та управління в складних системах (КУСС-2016)» (м. Вінниця, 3–6 жовтня 2016); X Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка» (м. Харків 5–7 жовтня 2016); міжнародна науково-практична конференція «Потенціал сучасної науки» (м. Київ, 8–11 листопада 2016).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 27 праць, зокрема 9 статей надруковано у фахових виданнях, затверджених МОН України, 14 публікацій у збірках матеріалів та тезах доповідей та 4 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел і 12 додатків. Загальний обсяг наукової роботи 205 сторінок, з яких основний зміст викладено на 164 сторінках друкованого тексту. Наукова робота містить 5 таблиць та 65 рисунків. Список використаних джерел складається з 142 найменувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ф. Матіко, В. Роман і Р. Федоришин, «Порівняльний аналіз методів визначення швидкості звуку», *Вимірювальна техніка та метрологія*, № 73, с. 56-62, 2012.
- [2] О. М. Богуш, «Промышленные ультразвуковые расходомеры газа», *ООО «Пьезоэлектрик»*, Ростов-на-Дону, Россия, 2012.
- [3] С. Н. Марущенко, «Оценка метрологических характеристик различных типов ультразвуковых расходомеров на основе разработанной классификации», *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, № 56, с. 107-115, 2012.
- [4] Й. Й. Білінський, Б.П. Книш і М.В. Гладишевський, «Визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 112-119, 2014.
- [5] М. П. Андрієшин, Р. А. Домницький, С. І. Дехтярчук, А. В. Едель і М.В. Гладишевський, «Вплив фізико-хімічних показників газу на ефективність роботи газових приладів», *Нафтогазова галузь України*, № 6, с. 34-39, 2014.
- [6] Й. Й. Білінський, М. О. Стасюк і М. В. Гладишевський, «Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ і класифікація на їх основі», *Наукові праці ВНТУ*, №1, 2015, [Електронний ресурс] Доступно: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3748/5468>.
- [7] М. В. Гладишевський, «Аналіз системи вимірювання витрат газу» на *IX Міжнародній науково-практичній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2009, с. 56.
- [8] В. С. Єременко і М. В. Гладишевський, «Методика обліку природного газу на базі ультразвукового лічильника», на *XI Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2011, с. 125.
- [9] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Аналіз метрологічних характеристик засобів вимірювання об'єму та витрати плинних середовищ», на *Всеукраїнському семінар-наradі. Облік природного газу та метрологія*, Козин, 2016, с. 13-15.

- [10] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Аналіз ультразвукових засобів вимірювального контролю витрати плинних середовищ», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 23-29, 2016.
- [11] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Розробка ультразвукового методу вимірювання швидкості плинних середовищ», *Технологічний аудит та резерви виробництва*, № 4/1, с. 19-24, 2015.
- [12] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Новий ультразвуковий метод вимірювання витрат плинних середовищ», *Нафтогазова галузь України*, № 2, с. 35-39, 2016.
- [13] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Методика проектування амплітудно-частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку», на *XV Міжнародній науково-технічній конференції. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, Одеса, 2015, с. 37-39.
- [14] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Математична модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ», на *III Міжнародній науковій конференції. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах*, Вінниця, 2015, с. 128-129.
- [15] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Експериментальне дослідження підсилювача для ультразвукового витратоміра», на *Міжнародній науково-практичній конференції. Потенціал сучасної науки*, Вінниця, 2016, с. 21-23.
- [16] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Моделювання роботи підсилювача для ультразвукового витратоміра», на *XIII Міжнародній конференції. Контроль та управління в складних системах (КУСС-2016)*, Вінниця, 2016, с. 71-73.
- [17] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Алгоритм мікропроцесорної обробки вимірювання швидкості потоку», на *X Міжнародній науково-технічній конференції. Метрологія та вимірювальна техніка*, Харків, 2016, с. 94.

- [18] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і В. Б. Бурдейний, «Модель поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі», *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, № 42(1214), с. 17-21, 2016. Doi. 10.20998/2413-4295.2016.42.03.
- [19] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання ультразвукового амлітудно-частотного вимірювача швидкості плинних середовищ», *Методи та прилади контролю якості*, № 2(37), с. 67-71, 2016.
- [20] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання ультразвукового засобу вимірювального контролю витрати плинних середовищ», *Вісник Хмельницького національного університету, Серія: Технічні науки*, № 1(245), с. 191-195, 2017.
- [21] Й. Й. Білінський, Б. П. Книш і М. В. Гладішевський, «Аналізатор кількісного вмісту скрапленого нафтового газу», на *7-й Міжнародній науково-технічній конференції і виставці Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання*, Івано-Франківськ, 2014, с. 37.
- [22] М. В. Гладішевський, А. А. Рижкова і Д. О. Харламов, «Шляхи забезпечення єдності вимірювань на підприємствах», на *X Міжнародній науково-технічній конференції. АВІА-2011*, Київ, 2011, с. 71-74.
- [23] В. С. Єременко і М. В. Гладішевський, «Сучасні прилади обліку витрат газу», на *X Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2010, с. 152.
- [24] Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ», на *I Міжнародній науково-технічній конференції. Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015*, Житомир, 2015, с. 53-54.
- [25] С. В. Ряховский і Л. Г. Паскаль, «Основные принципы создания единой системы учета газа в региональной компании поставщика газа», *Энергосбережение*, № 10, 2005.

- [26] Л. Н. Тюленев, В. В. Шушерин и А. Ю. Кузнецов, «Методы и средства измерений, испытаний и контроля», *Конспект лекций ГОУ ВПО УГТУ УПИ*, Екатеринбург, Россия, № 2, с. 76, 2005.
- [27] ЭлектроТехИнфо: информационная торговая система, «Тахометрические счетчики и расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды тахометрических счетчиков и расходомеров», [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_527.html.
- [28] MESKOTEXMESS- UNDKONTROLLTECHNIK, «Диафрагменные расходомеры», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.meskotex.com/diaphragm.html>.
- [29] DS/OM–RU Редакция 2, «Компактный диафрагменный расходомер OriMaster. Техническое описание», [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/0b3b45a281a88c9bc12575a80037b487/\\$file/ds_om-ru_2.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/0b3b45a281a88c9bc12575a80037b487/$file/ds_om-ru_2.pdf).
- [30] To build, «Виды газовых счётчиков: мембранные, ротационные, турбинные счётчики. Вихревой расходомер», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://gas.to-build.ru/content/view/56/44/>.
- [31] LICON, «Типы расходомеров», [Электронный ресурс]. Доступно: http://eclicon.ru/?page_id=1450.
- [32] MESKOTEXMESS- UNDKONTROLLTECHNIK, «Турбинные расходомеры», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.meskotex.com/hm.htm>.
- [33] Правила метрологии ПР 50.2.019-2006, «Объем и энергосодержание природного газа. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика выполнения измерений при помощи турбинных, ротационных и вихревых счетчиков», *Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии*, Москва, Россия, 2006.
- [34] Д. В. Тросников и В. Н. Жук, «Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации», *Энергетика и ТЭК*, № 4, 2008.

- [35] Газовик, «Турбинные счетчики газа», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://gazovik-gaz.ru/spravochnik/consum/turbinnyie-schetniki-gaza.html>.
- [36] YOKOGAWA, «Вихревой расходомер, вихревой расходомер — принцип действия», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.yokogawa.ru/measurementcharge?prod=443>.
- [37] Технический паспорт D184S035U03 Rev. 12, «2-проводное компактное устройство. Измерительный преобразователь на базе цифрового сигнального процессора», [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/53187d45f8a21695c1257950003daaec/\\$file/D184S035U03-RU-12-11_2011.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/53187d45f8a21695c1257950003daaec/$file/D184S035U03-RU-12-11_2011.pdf).
- [38] Руководство по эксплуатации 00809-0107-4860, «Расходомеры вихревые Rosemount 8600D», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00809-0107-4860.pdf>.
- [39] С. А. Золотаревский, «Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации», *Энергоанализ и Энергоэффективность*, № 4, 2006.
- [40] Руководство по эксплуатации 2.784.000 РЭ, «СЧЁТЧИК ГАЗА РОТАЦИОННЫЙ РГ-К-Ех», [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.ppx.ru/product/re_rgk.pdf.
- [41] ПРАМЕНЬ, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://npropramen.ru/information/other-flowmeters/specific-methods/3-jet-flowmeters>.
- [42] С. А. Золотаревский, О. Г. Гуцин и И. Ю. Иванушкин, «Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации», *Ежегодный сборник научно-технических статей, выпускаемый ООО “ЭЛЬСТЕР Газэлектроника”*, 2012.
- [43] Э. И. Чаплыгин, Ю. В. Земсков и В. В. Корзин, «Математическая модель струйного расходомера», *Журнал технической физики*, № 4(74), с. 16-19, 2004.
- [44] В. Н. Жук, «Измерение расхода с использованием осредняющих напорных трубок», *Энергетика и ТЭК*, № 2, 2010.

- [45] ETS, «Основные принципы измерения расхода газа с помощью осредняющей напорной трубки», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.ets.inf.ua/PDF/Intra/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D1%8B%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20ITABAR-%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B4.pdf>.
- [46] ПРАМЕНЬ, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://ru-auto.info/post/101488904990008/>.
- [47] ПРАМЕНЬ, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://megapaskal.ru/pribory/rashod-pribor/228-i-snova-rashodomery-rashodomery-ionizacionnye.htm><http://ru-auto.info/post/101488904990008/>.
- [48] ОIЛОТР, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://ru-auto.info/post/101488904990008/>
- [49] Расходомер.ру, «Струйные расходомеры», [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.td-rashodomer.ru/info/articles/elektromagnitnii_rashodomer.htm.
- [50] А. М. Деревягин, А. С. Фомин, В. В. Козлов, «Новый способ измерения расхода природного газа ультразвуковым методом», *Газпром*, Москва, Россия, 2008.
- [51] М. П. Андріішин, «Вимірювання витрати та кількості газу», *Довідник ПП “Сімик”*, Івано-Франківськ, с. 160, 2004.
- [52] Thompson E, «Fundamentals of multipath ultrasonic flow meters for gas measurement», *Sick Maihak Inc.*, Huston, USA, 2008.
- [53] Взлет.ру, «От однолучевых ультразвуковых расходомеров к многолучевым: критерий выбора», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.vzljot.ru/files/publications/odnoluch-ultrasonic.pdf><http://ru-auto.info/post/101488904990008/>.
- [54] P. Chattopadhyay, «Flowmeters & Flow Measurement», New Delhi, № 2, с. 76, 2006.

- [55] Электротехинфо, «Ультразвуковые расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды ультразвуковых расходомеров», [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_529.html.
- [56] YOKOGAWA, «Измерения расхода с помощью кориолисовых расходомеров в случае двух фазного потока», [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_529.html.
- [57] ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ И МАТЕМАТИКА, «Сила Кориолиса в общем курсе физики», [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.pskgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wt141/wt141_02.pdf.
- [58] Autoworks, «Измерение массового расхода. Кориолисовый расходомер», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://autoworks.com.ua/teoreticheskie-svedeniya/izmerenie-massovogo-rasxoda-koriolisovyj-rasxodomer/>.
- [59] J. Lansing, «Principles of operation for ultrasonic gas flow meters», *American school of gas measurement technology*, USA, 2003.
- [60] R. C. Baker, «Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance and applications», *Cambridge university press*, New York, 2000.
- [61] M. Rychagov, S. Tereshchenko, B. Dean and L. Lynnworth, «Multipath Flowrate Measurements of Symmetric and Asymmetric Flows», *1st World Congress on Industrial Process Tomography*, Buxton, 1999.
- [62] Honeywell Process Solutions, «Ultrasonic Flowmeter USM-GT-400», *leaflet*, 2014.
- [63] Асунг.ру, «Рекомендации по подбору и применению ультразвукового счетчика газа Flowsic 600.», [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.asu-ng.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=75%3A-flowsic-600&catid=43%3Aflowsic-600&Itemid=108.
- [64] Sick.in.ua, «FLOWSIC600 2PLEX», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://sick.in.ua/produktsiya/rashodomery-gaza-dlya-promyshlennyh->

izmerenij/dlya-transportirovki-gaza-i-promyshlennyh-izmerenij-s-povyshennoj-tochnostyu/flowsic600-2plex-2/#2.

- [65] Sick.in.ua, «FLOWSIC600 QUATRO», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://sick.in.ua/flowsic600-quatro>.
- [66] Energo.kh.ua, «Ультразвуковые счетчики газа ГУВР-011», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://energo.kh.ua/rusvs/Produkcija/GUVR-011>.
- [67] Statusgas.com, «Q.Sonic®plus», [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.statusgas.com/DS_QSonicplus_EN.pdf.
- [68] Sovlad.com.ua, «Счётчик газа ультразвуковой «Курс-01»», [Электронный ресурс]. *Руководство по эксплуатации*, Доступно: http://sovlad.com.ua/files/curs-01_manual_2009.pdf.
- [69] RMA Mess-und Regel technik GmbH&Co.KG, «Ultrasonic gas meter ECOSONIC X12», *Інструкція з експлуатації*, 2012.
- [70] Honeywell Process Solutions, « Ultrasonic flow meter USZ-08», *Інструкція з експлуатації*, 2010.
- [71] ElsterInstromet, «Q.Sonic Ultrasonic gas flow meters», *Інструкція з експлуатації*, 2009.
- [72] SICK MAIHAK GmbH, «FLOWSIC Volume Flow and Gas Flow Measuring Devices», *Інструкція з експлуатації*, 2008.
- [73] Sick.in.ua, «FLOWSIC500 CIS Ультразвуковой счетчик газа», [Электронный ресурс]. Доступно: <http://sick.in.ua/wp-content/uploads/2015/07/FLOWSIC500-CSI.pdf>.
- [74] И. В. Лазарев, «Метод синтеза структур адаптивных измерителей временных параметров импульсов сложной формы по критерию «Эффективность – интегрированные затраты» в условиях параметрической априорной неопределенности», *Вестник Воронежского института МВД России*, № 1, с. 144-148, 2010.
- [75] Е. П. Осадчий, «Проектирование датчиков для измерения механических величин», *Машиностроение*, с. 480, Росія, 1979.

- [76] E. J. Thompson, «Two beam ultrasonic flow measurement» *Ph. D. Thesis*, University of London, 1978.
- [77] Krohne, «Fundamentals of Ultrasonic flow measurement», *Інструкція з експлуатації*, 2001.
- [78] R. E. Fischbacker, «The ultrasonic flowmeter», *Trans. Soc. Inst. Tech*, №11(114), 1959.
- [79] Е.А. Воробьев, «Теория ультразвуковых колебаний как основа построения и применения технических средств получения информации», *Учебное пособие*, с. 54, 2002.
- [80] В. Т. Грінченко, І. В. Вовк і В. Т. Маципура, «Основи акустики», *Наукова думка*, с. 640, 2007, ISBN 978-966-00-0622-5.
- [81] ГОСТ 30319.2-2015, «Газ природный Методы расчета физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о плотности при стандартных условиях и содержания азота и диоксида углерода», *Издательство стандартов*, Москва, с. 72, 1997.
- [82] Д. И. Блохинцев, «Акустика неоднородной движущейся среды», *Издательство Москва*, № 2, 1981.
- [83] Л. А. Чернов, «Акустика движущейся среды», *Обзор, Акустический журнал*, № 4(4), с. 299-306, 1958.
- [84] В. И. Татарский, «Распространение волн в турбулентной атмосфере» *Аэроакустика*, Москва, 1981.
- [85] H. Tijdeman, «On the propagation of sound waves in cylindrical tubes», *Journal of Sound and Vibration*, № 39(1), с. 1-33, 1975, doi:10.1016/S0022-460X(75)80206-9.
- [86] O. J. Bjerring and T. M. Sand, «Non-invasive measurement of pressure gradients in pulsatile flow using ultrasound», *IEEE International Ultrasonics Symposium*, с. 2022-2025, 2013. doi: 10.1117/12.2006732.

- [87] T. Gudra and L. Palasz, «Ultrasonic transducers with directional converters of vibration of longitudinal-longitudinal type and longitudinal-longitudinal-longitudinal type intended to work in gaseous media», *The Journal of the Acoustical Society of America*, № 133(5), с. 3600, 2013, doi: 10.1121/1.4806670.
- [88] И. И. Крюков, «О размере ближней зоны плоских ультразвуковых преобразователей, находящихся на одной оси», *Акустический журнал*, № 1(44), с. 101-105, 1995.
- [89] S. Mensah and E. Franceschini, «Near-field ultrasound tomography», *The Journal of the Acoustical Society of America*, № 121(3), с. 1423-1433, 2007.
- [90] H.-M. Zhu and Q.-H. Qin, «Statistics of ultrasonic speckles reflected from a rough surface», *Archive of Applied Mechanics*, № 72(2), с. 189-198, doi: 10.1007/s00419-002-0205-1.
- [91] E. Blomme and O. Leroy, «Plane-wave analysis of the near field of light diffracted by ultrasound», *The Journal of the Acoustical Society of America*, № 91(3), с. 1474-1483, 1992.
- [92] Y. Takeda, «Ultrasonic Doppler velocity profile for fluid flow», *Springer Japan*, 2012.
- [93] E. Iervolino, M. Ricciob, A.W. van Herwaarden, A. Iraceb, G. Bregliob, W. van der Vlistc and P.M. Sarroc, «Temperature dependence of the resonance frequency of thermogravimetric devices», *Procedia Engineering*, № 5, с. 948-951, 2010, doi:10.1016/j.proeng.2010.09.265.
- [94] A. A. Kofi and A. C. Makinwa, «MOS Temperature-to-Frequency Converter With an Inaccuracy of Less Than 0.5 C From 40 C to 105 C», *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*, № 41(12), 2006.
- [95] J. L. Murgatroyd and J. D. Holder, «A Multipoint Temperature-to-Frequency Transducer», *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, № 26(1), с. 27-29, 1979, doi: 10.1109/TIECI.1979.351602.
- [96] Signal Processing. [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.signal-processing.com/us_field.html.

- [97] Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ», на *Всеукраїнському семінар-наradі. Облік природного газу та метрологія*, Рівне, 2015, с. 13-14.
- [98] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і О. С. Городецька, «Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідких і/або газоподібних середовищ», *98518 МПК G0FB 1/00 № U201413183*, Квіт. 27, 2015.
- [99] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський і О. С. Городецька, «Ультразвуковий витратомір», *99227 МПК G0FB 1/00 № U201413183*, Трав. 25, 2015.
- [100] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський, О. С. Городецька і Я. В. Яхимович, «Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідких і/або газоподібних середовищ», *121664 МПК G01F 1/66 № U201706593*, Груд. 11, 2017.
- [101] H. Wang, Y. Zhu, J. Chen, «A design method of decoupling IMC controller for multi-variable system based on Butterworth filter», *American Control Conference*, с. 5714-5721, 2017, doi:10.23919/ACC.2017.7963845.
- [102] Расчет аналогового нормированного фильтра нижних частот Баттерворта [Електронний доступ]. Доступно: <http://dsplib.ru/content/filters/butterex/butterex.html>.
- [103] Analog devices, «AD8055/AD8056 Datasheet» [Електронний доступ]. Доступно: <http://www.darasheetcatalog.com>.
- [104] G. Paul and I. Huray, «Appendix A: Measurement Errors in Maxwell's Equations», *Wiley-IEEE Press*, № 1, с. 275, 2010, doi: 10.1002/9780470549919.app1.
- [105] J. Vincent, «Measurements and Uncertainty», *Wiley Telecom*, с. 584, 2016, doi: 10.1002/9781119011897.ch11.
- [106] Ю. Ф. Павленко, «Дослідження методу вимірювання девіації частоти частотно модульованого сигналу з використанням електронно-лічильного частотоміру», *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 42(948), с. 4, 2012.
- [107] F. Akasheh, T. Myers, J. Fraser, S. Bose and A. Bandyopadhyay, «Development of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers», *Sensors and Actuators*, № 111(2-3), с. 275-287, 2004, ISSN 0924-4247, doi: 10.1016/j.sna.2003.11.022.

- [108] C. Keng, «Chapter 11 - Error Amplifiers, In Switch-Mode Power Converters», *Academic Press*, c. 237-248, 2006, ISBN 9780120887958, doi: 10.1016/B978-012088795-8/50011-8.
- [109] A. Grami, «Chapter 5 - Analog-to-Digital Conversion, In Introduction to Digital Communications», *Academic Press*, c. 217-264, 2016, ISBN 9780124076822, doi: 10.1016/B978-0-12-407682-2.00005-3.
- [110] F. Heijden, M. Korsten and W. Olthius, «Chapter 6 - Analogue to Digital and Digital to Analogue Conversion», *Measurement Science for Engineers*, c. 141-161, 2004, ISBN 9781903996584, doi: 10.1016/B978-190399658-4/50007-1.
- [111] J. Smith, «Chapter 11 - Analog-to-Digital Conversion, In Embedded Technology», *Newnes Programming the PIC Microcontroller with MBASIC*, c. 211-230, 2005, ISBN 9780750679466, doi: 10.1016/B978-075067946-6/50013-4.
- [112] Rosemount™, «3144P Temperature Transmitter», *Product Data Sheet*, № RB, 2017.
- [113] Rosemount™, «2088 Absolute and Gage Pressure Transmitter», *Product Data Sheet*, № PD, 2016.
- [114] Z. Fang, L. Hu, L. Qin, K. Mao, W. Chen and X. Fu, «Estimation of ultrasonic signal onset for flow measurement», *Flow Measurement and Instrumentation*, № 55, c. 1-12, 2017, ISSN 0955-5986, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.04.002.
- [115] H. Zhou, T. Ji, R. Wang, X. Ge, X. Tang and S. Tang, «Multipath ultrasonic gas flow-meter based on multiple reference waves», *Ultrasonics*, № 82, c. 145-152, 2018, ISSN 0041-624X, doi: 10.1016/j.ultras.2017.07.010.
- [116] P. LaNasa and E. Loy Upp, «7 – Flow», *Fluid Flow Measurement*, № 3, c. 107-116, 2014, ISBN 9780124095243, doi: 10.1016/B978-0-12-409524-3.00007-1.
- [117] S. Mokhatab, W. Poe and J. Mak, «Chapter 1 - Natural Gas Fundamentals», *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing, Gulf Professional Publishing*, № 3, c. 1-36, 2015, ISBN 9780128014998, doi: 10.1016/B978-0-12-801499-8.00001-8.
- [118] ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 (ИСО 5167-1-5:2003), «Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням

стандартних звужувальних пристроїв», *Державний стандарт України*, 2009.

- [119] A. Morris and R. Langari, «Chapter 4 - Statistical Analysis of Measurements Subject to Random Errors», *Measurement and Instrumentation, Academic Press*, № 2, с. 75-130, 2016, ISBN 9780128008843, doi: 10.1016/B978-0-12-800884-3.00004-6.
- [120] S. Narasimhan and C. Jordache, «2 - Measurement Errors and Error Reduction Techniques», *Data Reconciliation and Gross Error Detection, Gulf Professional Publishing*, с. 32-58, 1999, ISBN 9780884152552, doi: 10.1016/B978-088415255-2/50003-3.
- [121] R. Acharya, «Chapter 7 - Errors and Error Corrections», *In Understanding Satellite Navigation, Academic Press*, с. 243-279, 2014, ISBN 9780127999494, doi: 10.1016/B978-0-12-799949-4.00007-5.
- [122] M. Parker, «Chapter 3 - Sampling, Aliasing, and Quantization, In Digital Signal Processing 101», *Newnes*, № 2, с. 21-30, 2017, ISBN 9780128114537, doi: 10.1016/B978-0-12-811453-7.00003-2.
- [123] L. Tan and J. Jiang, «Chapter 2 - Signal Sampling and Quantization», *Digital Signal Processing, Academic Press*, № 2, с. 15-16, 2013, ISBN 9780124158931, doi: 10.1016/B978-0-12-415893-1.00002-0.
- [124] P. West, «A guide to the flowmeter maze», *World Pumps*, № 2001(420), с. 48-54, 2001, ISSN 0262-1762, doi: 10.1016/S0262-1762(01)80364-3.
- [125] M. Dell'Isola, M. Cannizzo and M. Diritti, «Measurement of high-pressure natural gas flow using ultrasonic flowmeters», *Measurement*, № 20(2), с. 75-89, 1997, ISSN 0263-2241, doi: 10.1016/S0263-2241(97)00016-X.
- [126] F. Cascetta, «Application of a portable clamp-on ultrasonic flowmeter in the water industry», *Flow Measurement and Instrumentation*, № 5(3), с. 191-194, 1994, ISSN 0955-5986, doi: 10.1016/0955-5986(94)90019-1.
- [127] Q. Chen, W. Li and J. Wu, «Realization of a multipath ultrasonic gas flowmeter based on transit-time technique», *Ultrasonics*, № 54(1), с. 285-290, 2014, ISSN 0041-624X, doi: 10.1016/j.ultras.2013.06.001.

- [128] V. Button, «Chapter 7 - Flow Transducers», *Principles of Measurement and Transduction of Biomedical Variables, Academic Press*, с. 271-323, 2015, ISBN 9780128007747, doi: 10.1016/B978-0-12-800774-7.00007-6.
- [129] А.Г. Сергеев, М.В. Латышев и В.В. Терегеря, «Метрология, стандартизация, сертификация», *учебник*, Изд-во Юрайт, ИД Юрайт, с. 345, 2011.
- [130] В. В. Онушко, Д. Р. Піталов і І. В. Щупак, «Особливості повірки вимірювальних комплексів «Суперфлоу» на прикордонних ГВС», на *Вимірювання витрат та кількості газу: 6-а всеукраїнська науково-технічна конференція*, с. 41, Івано-Франківськ, 2009.
- [131] О. Н. Партала, «Цифровая электроника», *Наука и техника*, с. 208, 2000.
- [132] Государственная система обеспечения единства измерений, «Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений относительной влажности газов: ГОСТ 8.547-86», *Госстандарт СССР, Издательство стандартов*, с. 8, 1986.
- [133] Б. Б. Дунаев, «Точность измерений при контроле качества», *Техніка*, с. 152, 1981.
- [134] Е. Т. Володарский и И.П. Москаленко, «Уменьшение влияния погрешности измерительного канала на достоверность контроля», *Измерения – 98*, с. 266-267, 1998.
- [135] Б. Г. Федорков, «Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение», *Энергоатомиздат*, с. 320, 1990.
- [136] Е. С. Венцель и Л.А.Овчаров, «Теория случайных процессов и ее инженерные приложения», *Наука*, с. 384, 1991.
- [137] В. Н. Лавренчик, «Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов», *Энергоатомиздат*, с. 272, 1986.
- [138] Д. А. Браславский и В. В. Петров, «Точность измерительных устройств», «Машиностроение», с. 312, 1976.
- [139] А. Е. Егоров, Г. Н. Азаров и А. В. Коваль, «Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента», *Вища школа*, с. 240, 1986.

- [140] Х. Шенк, «Теория инженерного эксперимента», *Мир, Издательство стандартов*, с. 381, 1972.
- [141] В. В. Онушко, А. М. Власюк і В. М. Ярошевич, «Комплекс вимірювальний роторний КВР-1», на *Приладобудування 2011 : 10-а міжнародна науково-технічна конференція*, с. 223-224, Київ, 2011.
- [142] В. П. Максимов, И. В. Егоров и В. А. Карасев, «Измерение, обработка и анализ быстропротекающих процессов», *Машиностроение*, с. 208, 1987.