

Й. Й. Білінський<sup>1</sup>  
В. Б. Бурдейний<sup>1</sup>

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ФАЗО-ЧАСТОТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ЗАКРИТИХ ТРУБОПРОВОДАХ МАЛОГО ДІАМЕТРА

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Досліджено можливість розробки фазо-частотного ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості потоку природного газу в закритих трубопроводах малого діаметра. Аналіз сучасних ультразвукових витратомірів показує наявність мертвої зони у разі невеликого діаметра газопроводу, що вимагає інших рішень в умовах ближньої зони. Це зумовлює необхідність створення витратомірів з високими метрологічними характеристиками та широкою сферою застосування. Розроблено математичну модель фазо-частотного ультразвукового вимірювального перетворювача, використовуючи яку, швидкість потоку можна визначити за допомогою чотирьох частот ультразвукової хвилі та відповідних фазових зсувів сигналів, за яких фазові зсуви лежали в межах кількості цілих довжин акустичної хвилі. Це дає змогу розширити робочий діапазон, вибрати оптимальну частоту ультразвукової хвилі для роботи вимірювального перетворювача та збільшити точність вимірювання. На основі запропонованої математичної моделі, розроблено структурну схему фазо-частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку та засобу вимірювального контролю витрат природного газу, який складається з ділянки трубопроводу, двох передавальних та двох приймальних п'єзоелементів, двох генераторів, двох формувачів імпульсів, двох фазових детекторів та мікропроцесорного блока. Для дослідження запропонованої математичної моделі вимірювального перетворювача зібрано експериментальну установку, що складається з генератора сигналів, осцилографа, вимірювальних датчиків, розміщених на ділянці трубопроводу, та генератора потоку повітря, і дає змогу отримати залежність зсуву фази сигналів від швидкості потоку. Отримані експериментальні дані свідчать про перспективність практичного застосування фазо-частотного методу вимірювання швидкості потоку та створення на його базі ультразвукового витратоміра з високими метрологічними характеристиками, здатного працювати в умовах ближньої зони.*

**Ключові слова:** швидкість потоку, природний газ, фазо-частотний ультразвуковий метод.

### Вступ

Ультразвукові витратоміри вперше почали використовувати з 1970-х років [1]. Незважаючи на промисловий успіх використання ультразвукових витратомірів для вимірювання рідини, існують певні труднощі при застосуванні ультразвукових витратомірів для вимірювання потоку газів в металевих трубах, позаяк загасання сигналу в більшості газів набагато більше, ніж у звичайних рідинах на тій самій частоті [2].

Аналіз сучасних ультразвукових витратомірів в [3] показує, що більшість широко використовуваних витратомірів мають недоліки, пов'язані з залежністю швидкості звуку від густини вимірювального середовища, наявністю мертвої зони за невеликого діаметра газопроводу, що вимагає інших рішень в умовах ближньої зони. Таким чином, є необхідність створення витратомірів з високими метрологічними характеристиками та широкою сферою застосування. Оскільки часоімпульсні витратоміри не працюють у трубопроводах малого діаметра [4], зазвичай використовують фазові витратоміри.

Принцип роботи фазових витратомірів оснований на вимірюванні зсуву фаз ультразвукових ко-

ливань, спрямованих за та проти руху потоку. В однопроменевих фазових витратомірах навіть незначні коливання температури чи тиску можуть створити такі зрушення фази на приймальному п'єзоелементі в порівнянні з випромінювальним, які виходитимуть за межі робочої характеристики фазового детектора. Цьому можна запобігти, застосувавши прилади з вимірювальними схемами, що здійснюють безпосереднє порівняння фаз обох прийнятих коливань (за потоком та проти потоку), або перехід до двопроменевих витратомірів [5].

Недоліком фазових витратомірів є обмеженість в діапазонах вимірювання. У фазових витратомірах частота вибирається так, щоб за максимального потоку отримати найбільшу різницю фаз, яка може бути виміряна фазометром. Тоді як у частотних і часо-імпульсних витратомірах вибирають високу частоту 5...10 МГц, а іноді навіть і 20 МГц, тому що збільшення частоти сприяє підвищенню точності вимірювання, але це відноситься до рідин. У газових середовищах доводиться знижувати частоту до сотень кілогерц через труднощі створення в газах інтенсивних акустичних коливань, особливо високої частоти [6].

*Метою роботи є дослідження можливості розробки фазо-частотного ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості потоку природного газу в закритих трубопроводах малого діаметра.*

### Результати дослідження

Час проходження акустичної хвилі через газове середовище за потоком визначається як

$$t_{bf} = \frac{S}{V_0 + V_f \cdot \cos(\theta)}, \quad (1)$$

де  $S$  — відстань проходження ультразвукової хвилі,  $V_0$  — швидкість ультразвукової хвилі в газовому середовищі без наявності потоку газу,  $V_f$  — швидкість потоку газу,  $\theta$  — кут нахилу датчиків до поперечного перерізу труби.

Час проходження акустичної хвилі через газове середовище проти потоку визначається як

$$t_{af} = \frac{S}{V_0 - V_f \cdot \cos(\theta)}, \quad (2)$$

Час проходження акустичної хвилі через газове середовище за потоком або проти потоку, пов'язаний з кількістю довжин акустичної цілої хвилі, фазою та частотою сигналу, становить

$$t = \left( n + \frac{\varphi}{360} \right) \frac{1}{f}, \quad (3)$$

де  $n$  — кількість довжин акустичної цілої хвилі, які вміщуються в просторі між датчиками,  $\varphi$  — зсув фази між сигналами на передавальному і приймальному п'єзоелементі,  $f$  — частота сигналу.

Прирівнявши (1), (2) та (3), отримуємо:

$$\text{за потоком} \quad \frac{S}{V_0 + V_f \cdot \cos(\theta)} = \left( n_{bf} + \frac{\varphi_{bf1}}{360} \right) \frac{1}{f_{bf1}} = \left( n_{bf} + \frac{\varphi_{bf2}}{360} \right) \frac{1}{f_{bf2}}, \quad (4)$$

аналогічно проти потоку

$$\frac{S}{V_0 - V_f \cdot \cos(\theta)} = \left( n_{af} + \frac{\varphi_{af1}}{360} \right) \frac{1}{f_{af1}} = \left( n_{af} + \frac{\varphi_{af2}}{360} \right) \frac{1}{f_{af2}}, \quad (5)$$

звідки

$$n_{bf} = \frac{\frac{\varphi_{bf2}}{360 \cdot f_{bf2}} - \frac{\varphi_{bf1}}{360 \cdot f_{bf1}}}{\frac{1}{f_{bf1}} - \frac{1}{f_{bf2}}}; \quad (6)$$

$$n_{af} = \frac{\frac{\varphi_{af2}}{360 \cdot f_{af2}} - \frac{\varphi_{af1}}{360 \cdot f_{af1}}}{\frac{1}{f_{af1}} - \frac{1}{f_{af2}}}. \quad (7)$$

Підставивши (6) та (7) в (4) та (5), відповідно, отримаємо:

$$\frac{S}{V_0 + V_f \cdot \cos(\theta)} = \left( \frac{\frac{\Phi_{bf2}}{360 \cdot f_{bf2}} - \frac{\Phi_{bf1}}{360 \cdot f_{bf1}}}{\frac{1}{f_{bf1}} - \frac{1}{f_{bf2}}} + \frac{\Phi_{bf1}}{360} \right) \frac{1}{f_{bf1}}; \quad (8)$$

$$\frac{S}{V_0 - V_f \cdot \cos(\theta)} = \left( \frac{\frac{\Phi_{af2}}{360 \cdot f_{af2}} - \frac{\Phi_{af1}}{360 \cdot f_{af1}}}{\frac{1}{f_{af1}} - \frac{1}{f_{af2}}} + \frac{\Phi_{af1}}{360} \right) \frac{1}{f_{af1}}. \quad (9)$$

Таким чином

$$V_0 = \frac{360 \cdot S \cdot (f_{bf1} - f_{bf2})}{\Phi_{bf1} - \Phi_{bf2}} - V_f \cdot \cos(\theta); \quad (10)$$

$$V_0 = \frac{360 \cdot S \cdot (f_{af1} - f_{af2})}{\Phi_{af1} - \Phi_{af2}} + V_f \cdot \cos(\theta). \quad (11)$$

Прирівнявши (10) та (11), отримаємо:

$$V_f = \frac{360 \cdot S \cdot \left( \frac{f_{bf1} - f_{bf2}}{\Phi_{bf1} - \Phi_{bf2}} - \frac{f_{af1} - f_{af2}}{\Phi_{af1} - \Phi_{af2}} \right)}{2 \cos(\theta)}. \quad (12)$$

Таким чином швидкість потоку можна визначити за допомогою певних частот  $f_{bf1}$ ,  $f_{bf2}$ ,  $f_{af1}$ ,  $f_{af2}$  ультразвукової хвилі та відповідних фазових зсувах  $\Phi_{bf1}$ ,  $\Phi_{bf2}$ ,  $\Phi_{af1}$ ,  $\Phi_{af2}$  сигналів, за яких

фазові зсуви лежали в межах кількості цілих довжин акустичної хвилі від  $n_x$  до  $n_{x+1}$ .

Використовуючи математичну модель, побудовано графік залежності фазового зсуву від швидкості потоку за різних частот сигналу (рис. 1), де  $f_0$  — частота сигналу, за якого фазовий зсув не перевищує  $360^\circ$  у всьому робочому діапазоні (звичайний фазовий метод),  $f_1$ ,  $f_2$  — частоти сигналів, вищими  $f_0$ , за яких фазовий зсув перевищує  $360^\circ$ .

З рис. 1 випливає що, зі зростанням частоти, чутливість зсуву фази від швидкості потоку збільшується. Це дає змогу розширити робочий діапазон, вибрати оптимальну частоту ультразвукової хвилі для роботи вимірювального перетворювача та збільшити точність вимірювання.

На основі запропонованої математичної моделі, розроблено структурну схему фазо-

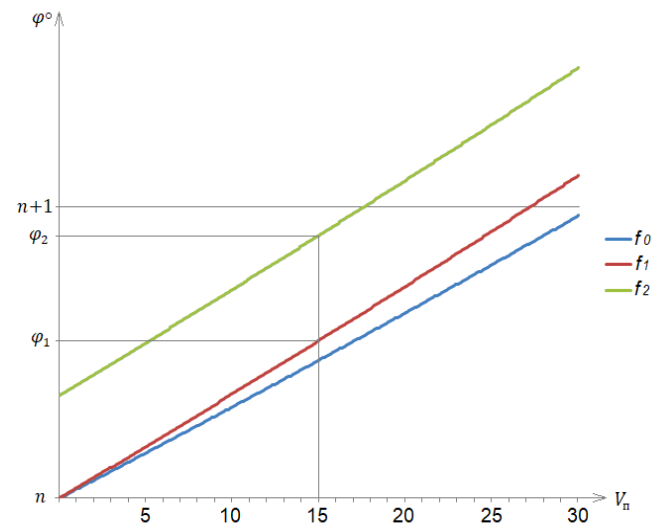


Рис. 1. Залежність фазового зсуву від швидкості потоку за різних частот сигналу

частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку та засобу вимірювального контролю витрат природного газу (рис. 2).

Засіб містить ділянку трубопроводу, два передавальних та два приймальних п'єзоелементи, два генератора, два формувача імпульсів, два фазових детектора та мікропроцесорний блок.

Мікропроцесорний блок встановлює початкову частоту для генераторів каналів А та Б. Сигнали з генераторів надходять на відповідні входи передавальних п'єзоелементів, які перетворюють еле-

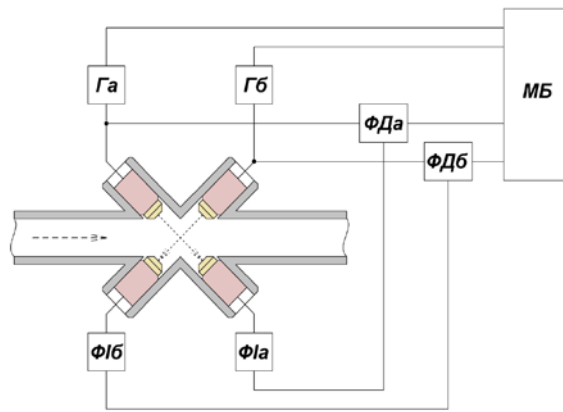


Рис. 2. Структурна схема фазо-частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку та засобу вимірювального контролю витрат природного газу

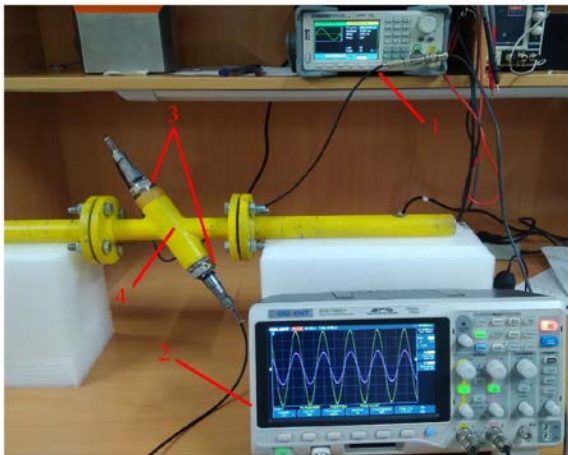


Рис. 3. Експериментальна установка

ктричний сигнал в акустичні хвилі.

Після проходження через газове середовище акустичні хвилі потрапляють на приймальні п'єзоелементи, які перетворюють їх в електричний сигнал, після чого відповідні формувачі імпульсів перетворюють сигнал в імпульсну форму. Сформовані імпульси та сигнали з генераторів потрапляють на входи відповідних фазових детекторів, які виділяють різницю фаз. Далі мікропроцесорний блок вимірює зсув фаз і за допомогою внутрішніх алгоритмів вибирає наступні частоти для повторення процедури вимірювання фази. Маючи два значення зсуву фаз за різних частот за потоку та проти потоку, мікропроцесорний блок вираховує значення швидкості потоку.

Для перевірки адекватності запропонованої математичної моделі вимірювального перетворювача використано експериментальну установку (рис. 3), яка складається з генератора сигналів Siglent SDG 1032X (1), осцилографа Siglent SDS1102X+ (2), вимірювальних датчиків ПЭА-114 (3), розміщених на відстані 0,04 м один від одного на ділянці трубопроводу (4) під кутом  $60^\circ$ , та генератора потоку повітря (на рисунку відсутній).

Експериментальна установка дає змогу отримати залежність зсуву фази сигналів від швидкості потоку.

Встановивши швидкість потоку 5 м/с та частоту генератора 187 кГц, отримано зсув фаз, у разі розповсюдження сигналу за потоком  $4,6^\circ$  (рис. 4а), та у разі розповсюдження сигналу

проти потоку  $123^\circ$  (рис. 4б).

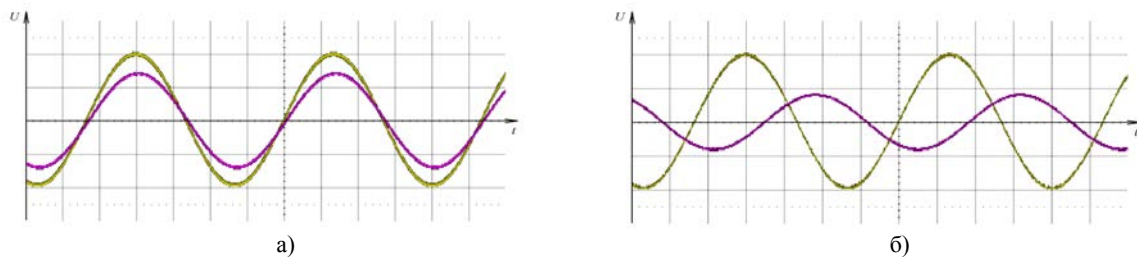


Рис. 4. Зсув фаз сигналу, коли швидкість потоку повітря 5 м/с і частота сигналу 187 кГц: а — за потоком; б — проти потоку

За частоти генератора 192 кГц отримано зсув фаз сигналу за потоком  $216,6$  (рис. 5а) та сигналу проти потоку  $338,1^\circ$  (рис. 5б).

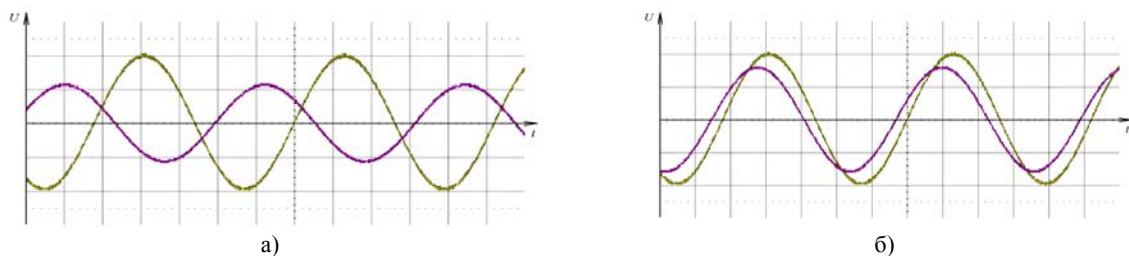


Рис. 5. Зсув фаз сигналу у разі швидкості потоку 5 м/с та частоти сигналу 192 кГц: а — за потоком; б — проти потоку

Встановивши швидкість потоку 10 м/с та частоту генератора 187 кГц, отримано зсув фаз, при розповсюдженні сигналу за потоком 306,8 (рис. 6а), та сигналу проти потоку — 183,5° (рис. 6б).

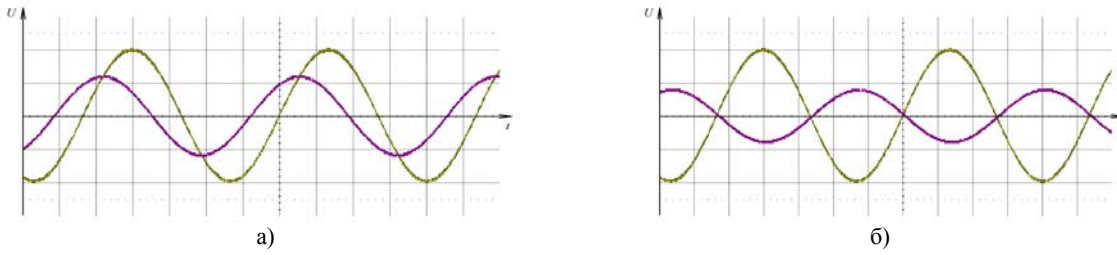


Рис. 6. Зсув фаз сигналу у разі швидкості потоку 10 м/с та частоти сигналу 187 кГц: а — за потоком; б — проти потоку

За частоти генератора 183 кГц, отримано зсув фаз сигналу за потоком 138,5 (рис. 7а), та проти потоку 10,2 (рис. 7б).

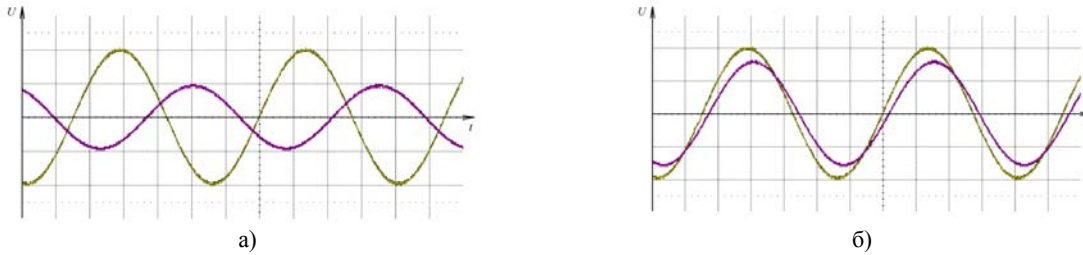


Рис. 7. Зсув фаз сигналу у разі швидкості потоку 10 м/с та частоти сигналу 183 кГц: а — за потоком; б — проти потоку

Встановивши швидкість потоку 15 м/с та частоту генератора 187 кГц, отримано зсув фаз, при розповсюдженні сигналу за потоком 249,7° (рис. 8а), та при розповсюдженні сигналу проти потоку 244,9° (рис. 8б).

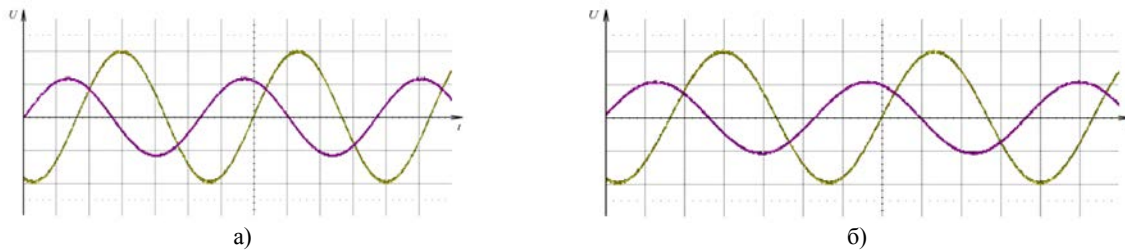


Рис. 8. Зсув фаз сигналу у разі швидкості потоку 15 м/с та частоти сигналу 187 кГц: а — за потоком; б — проти потоку

За частоти генератора 183 кГц отримано зсув фаз сигналу за потоком 82,7° (рис. 9а), та у разі розповсюдження сигналу проти потоку 70,3° (рис. 9б).

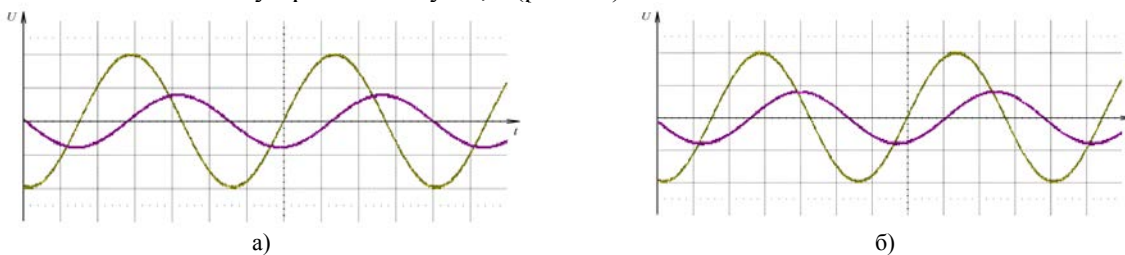


Рис. 9. Зсув фаз сигналу у разі швидкості потоку 15 м/с та частоти сигналу 183 кГц: а — за потоком; б — проти потоку

Підставивши експериментальні дані в (12), розраховано швидкості потоку, а результати занесені в таблицю.

**Розраховані швидкості потоку**

Швидкість потоку встановлена	5 м/с	10 м/с	15 м/с
Швидкість потоку розрахована	4,895 м/с	9,874 м/с	15,0133 м/с

Незначні відхилення розрахованих значень швидкості потоку пояснюється похибкою встановлення швидкості потоку та похибкою вимірювання фази осцилографом.

## Висновки

Запропоновано математичну модель та структурну схему фазо-частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку природного газу, суть роботи якого полягає у вимірюванні зсуву фаз між передавальним і приймальним сигналами за двох різних частот сигналу за потоком та проти потоку.

Результати досліджень дають можливість стверджувати перспективність для практичного застосування фазо-частотного методу вимірювання швидкості потоку. Таким чином, комбінацією фазового та частотного методів вимірювання, можна збільшити точність вимірювання швидкості руху плинного середовища, розширити робочий діапазон вимірювання, та створити ультразвуковий витратомір на базі запропонованого методу з високими метрологічними характеристиками, який здатен працювати в умовах ближньої зони.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. E. Brown, "Ultrasonic Flowmeters," *Flow Measurement — Practical Guides for Measurement Control*, no. 20, pp. 517-575, 2001.
- [2] A. X. Matson, J. Kucmas, P. O. Khrakovsky, and X. S. Li, "Ultrasonic Clamp-On Flow Measurement of Natural Gas, Steam and Compressed Air," in *5th International Symposium, Fluid Flow Measurement*, 2002, pp.7-10.
- [3] Й. Й. Білинський, «Аналіз ультразвукових засобів вимірювального контролю витрати плинних середовищ,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 23-29, 2016.
- [4] И. И. Крюков, «О размере ближней зоны плоских ультразвуковых преобразователей, находящихся на одной оси», *Акустический журнал*, № 1, с. 101-105, 1995.
- [5] В. К. Хамидуллин, *Ультразвуковые контрольно-измерительные устройства и системы*. Ленинград: изд-во Ленинградского Университета, 1989, с. 248.
- [6] П. П. Кремлевский, *Расходомеры и счетчики количества веществ*. Санкт-Петербург, Россия: Политехника, 2004, с. 412.

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

**Бурдейний Валентин Борисович** — аспірант кафедри електроніки та наносистем, e-mail: burdeinyi.v.b@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Y. Y. Bilynsky<sup>1</sup>**  
**V. B. Burdeinyi<sup>1</sup>**

## Investigation of the Opportunity to Develop a Phase-Frequency Ultrasonic Measuring Converter for the speed of Natural Gas Flow in Closed Small Diameter Pipeline

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The article explores the possibility of developing a phase-frequency ultrasonic measuring transducer of the gas flow velocity in closed pipelines of small diameter. Analysis of modern ultrasonic flow meters shows the presence of a dead zone with a small diameter of the pipeline, which requires other solutions in the near zone, which necessitates the creation of flow meters with high metrological characteristics and a wide range of applications. A mathematical model of a phase-frequency ultrasonic transducer has been developed, in which the flow rate can be determined using four ultrasonic wave frequencies and the corresponding phase shifts of the signals at which the phase shifts lie within the number of whole acoustic wavelengths. This allows extending the working range, selecting the optimal frequency of the ultrasonic wave for the operation of the measuring transducer and increasing the measurement accuracy. Based on the proposed mathematical model, a structural diagram of a phase-frequency measuring transducer for flow velocity and measuring means for controlling natural gas consumption was developed, which contains a pipeline section, two transmitting and two receiving piezoelectric elements, two generators, two pulse shapers, two phase detectors and a microprocessor unit. To study the proposed mathematical model of the measuring transducer, an experimental setup was assembled, consisting of a signal generator, an oscilloscope, measuring sensors located on the pipeline section, and an air flow generator, which allows to obtain the dependence of the phase shift of signals on the flow velocity. The obtained experimental data indicate the prospects for the practical application of the phase-frequency method of measuring the flow rate and create an ultrasonic flow meter based on this method with high metrological characteristics, which is able to work in near-zone conditions.*

**Keywords:** flow rate, natural gas, phase-frequency ultrasonic method.



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

**Burdeinyi Valentyn B.** — Post-Graduate Student of the Chair of Electronics and Nanosystems, e-mail: burdeinyi.v.b@gmail.com

**И. И. Билинский<sup>1</sup>**  
**В. Б. Бурдейный<sup>1</sup>**

## **Исследование возможности разработки фазо-частотного ультразвукового измерительного преобразователя скорости потока природного газа в закрытых трубопроводах малого диаметра**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Исследована возможность разработки фазо-частотного ультразвукового измерительного преобразователя скорости потока газа в закрытых трубопроводах малого диаметра. Анализ современных ультразвуковых расходомеров показывает наличие мертвой зоны при небольшом диаметре газопровода, что требует других решений в условиях ближней зоны. Это вызывает необходимость создания расходомеров с высокими метрологическими характеристиками и широкой сферой применения. Разработана математическая модель фазо-частотного ультразвукового измерительного преобразователя, используя которую можно определить скорость потока с помощью четырех частот ультразвуковой волны и соответствующих фазовых сдвигов сигналов, при которых фазовые сдвиги лежали бы в пределах количества целых длин акустической волны. Это позволяет расширить рабочий диапазон, выбрать оптимальную частоту ультразвуковой волны для работы измерительного преобразователя и увеличить точность измерения. На основе предложенной математической модели, разработана структурная схема фазо-частотного измерительного преобразователя скорости потока и средства измерительного контроля расхода природного газа, который содержит участок трубопровода, два передающих и два принимающих пьезоэлемента, два генератора, два формирователя импульсов, два фазовых детектора и микропроцессорный блок. Для исследования предложенной математической модели измерительного преобразователя собрана экспериментальная установка, состоящая из генератора сигналов, осциллографа, измерительных датчиков, расположенных на участке трубопровода, и генератора потока воздуха, которая позволяет получить зависимость сдвига фазы сигналов от скорости потока. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о перспективности практического применения фазо-частотного метода измерения скорости потока и создания ультразвукового расходомера на базе предложенного метода с высокими метрологическими характеристиками, способного работать в условиях ближней зоны.*

**Ключевые слова:** скорость потока, природный газ, фазо-частотный ультразвуковой метод.

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

**Бурдейный Валентин Борисович** — аспирант кафедры электроники и наносистем, e-mail: burdeinyi.v.b@gmail.com