

- [8] Tietze U., Schenk Ch. *Halbleiter Schaltungstechnik*, Achte überarbeitete Auflage, Berlin: Springer, 2002
- [9] LTD. GL55 Series Photoresistor – datasheet (Technical report). Senba Optical and Electronic Co., [Online]. Available:

<https://blackchip.com.ua/image/catalog/pdf/fotoreistor/GL55.pdf>

- [10] Д. Л. Лавренова, В. М. Хлистов, *Основи метрології та електричних вимірювань*: навч. посіб, Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2016.

**D. O. Pivtorak, O. M. Pavlovsky, S. O. Tsybulnyk**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*  
**EXPERIMENTAL STUDIES OF INFORMATION SIGNAL-TO-RESISTANCE CONVERTER FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM**

Potentiometric sensors are widely used in the construction of automatic and automated process control systems. In potentiometric sensors, resistance is the output signal and its magnitudes depend on the magnitude of the input signal. voltage, current, digital code, angle of rotation, displacement or other signal is usually used as the input signal. In practice, the task of simulating of the signal which coming from the built-in potentiometric sensor is often appeared. An additional potentiometric sensor can be used to simulate the signal of the built-in sensor that allows setting the required resistance magnitude by changing any external parameter.

The model of the voltage-to-resistance converter is made. This model allows simulating the potentiometric state sensor of the controlled system. The experimental determination of its transfer characteristic at different ambient temperatures is carried out. This model is based on a two-channel conversion circuit, which includes a source of optical radiation and two photoresistors optically connected to it. One of photoresistors is connected to a current stabilizer, while the voltage on it is analyzed by a tracking circuit that changes the brightness of the optical radiation source according to the magnitude of the control voltage. The transfer characteristic of the converter in the initial section has an insensitivity zone, following by a rectilinear section. Within the insensitivity zone, a change in input voltage does not change the output resistance. The magnitude of the insensitivity zone is determined by the maximum voltage on the incandescent lamp that determines its brightness, as well as the minimum possible resistance of the using illuminated photoresistor. Within the rectilinear section, the output resistance of the converter is linearly related to the magnitude of the input voltage. The conversion error does not exceed 0.6 % at an ambient temperature of 20° C. When the temperature decreases to -20° C, the conversion error increases to 7 %, which is due to differences in temperature errors of the photoresistors using in the model.

**Keywords:** converter; signal; resistance; photoresistor.

*Надійшла до редакції  
25 квітня 2022 року*

*Рецензовано  
16 травня 2022 року*

УДК 621.121

## ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВИТРАТИ ЗІ СКЛАДНОЮ ТРАЄКТОРІЄЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРОМЕНЮ

*Писарець А. В., Драчук О. О.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [anna.v@ukr.net](mailto:anna.v@ukr.net), [lesyaartemenko@gmail.com](mailto:lesyaartemenko@gmail.com)*

*Для вимірювання витрат паливно-енергетичних ресурсів застосовуються різні методи, що зумовлюють широку номенклатуру вимірювальних приладів. Через забезпечення високої точності вимірювання, широкого діапазону вимірюваних витрат, відсутність додаткових витрат напору и простоту конструкції, широкого застосування у вимірювальній практиці набувають прилади, що базуються на ультразвукових методах вимірювання. Такі прилади легко інтегруються до автоматизованих систем збору і передачі інформації. Суттєвою*

проблемою при застосуванні одноканальних ультразвукових вимірювачів є асиметричність потоку вимірюваного середовища, що успішно вирішується застосуванням багатоканальних перетворювачів витрати.

До недоліків багатоканальних ультразвукових перетворювачів витрати слід віднести значне ускладнення конструкції гідравлічного каналу, необхідність у використанні більш складних математичних алгоритмів обробки отриманого вихідного сигналу, що вимагає застосування швидкодіючих електронних елементів, насамперед – мікропроцесорів.

Альтернативою багатоканальному вимірюванню постає застосування перетворювача з багаторазовим відбиттям одного вимірювального променя від стінки вимірювального тракту.

Метою роботи є побудова математичної моделі ультразвукового перетворювача витрати зі складною траєкторією вимірювального променя. Для дослідження обрано схему із зондуванням по трьох хордах (при цьому проекції хорд на переріз вимірювальної ділянки утворюють рівносторонній трикутник), що реалізує час-імпульсний метод вимірювання, тобто передбачає визначення витрати за різницею часу проходження вимірювального променя за потоком та проти нього. Отримано аналітичний вираз характеристики перетворення для випадку декількох відбиттів променя в різних площинах.

Авторами відтворено гідравлічну частину досліджуваного перетворювача витрати, із застосуванням імітаційного моделювання, реалізованого на підрунті методу кінцевих елементів, здійснено моделювання роботи перетворювача у діапазоні вимірюваних витрат за умов ідеального сформованого профілю швидкості потоку газу у вхідному перерізі перетворювача, що підтвердило відсутність впливу елементів вимірювальної схеми (відбивачів променя) на профіль потоку та траєкторію вимірювального променя.

**Ключові слова:** газ; перетворювач витрати; відбиття променя; ультразвуковий витратомір; характеристика перетворення.

### Вступ. Постановка проблеми

Необхідність організації комерційного обліку паливно-енергетичних ресурсів, зокрема природного газу, зумовлює підвищення точності та технологічності вимірювань їх витрати, забезпечує можливість для їх реальної економії, дозволяє оцінювати втрати енергоносіїв, контролювати ефективність використання як у системах регулювання і керування технологічними процесами, так і у побуті. Тому актуальними залишаються питання вдосконалення методів і засобів вимірювання витрат.

Для контролю витрати газу використовуються багато технічних засобів, що ґрунтуються на різних методах вимірювання [1, 2]. Останнім часом усе більшого поширення набувають ультразвукові методи вимірювання витрати завдяки високій точності вимірювання, простоті конструкції, відсутності додаткових витрат напору (що, у свою чергу, пов'язано з відсутністю частин, що виступають у гідравлічний канал приладу), широкому діапазону вимірюваних витрат [1 – 6].

У загальному випадку будь-який ультразвуковий вимірювач витрати складається з гідравлічної та електронної частин. Усі вимірювальні сигнали опрацьовуються саме у електронній частині, головним елементом якої є мікропроцесор. Можливості сучасних мікропроцесорів виконувати одночасно множини різноманітних операцій, у тому числі автоматизовану передачу даних, дозволяють легко інтегрувати вимірювальні прилади до автоматизованих систем збору і передачі інформації за допомогою як дротових, так і бездротових середовищ [7, 8].

Ультразвукові прилади обліку класифікують за різними ознаками, значущими серед яких є [1 –

3, 9 – 11]: кількість вимірювальних променів (одноканальні, багатоканальні); розміщення вимірювального каналу (діаметральні, хордові); інформативний параметр вихідного сигналу (час проходження ультразвуку, фазовий зсув, ефект Доплера, зміщення ультразвуку, частота); спосіб монтажу (із зануреними п'єзоелементами, накладні), вид акустичного шляху (без відбиття, з відбиттям); спрямованість ультразвукового випромінювання.

Недоліками ультразвукового методу вимірювання є зростання похибок через асиметричність потоку, паразитні акустичні сигнали, зміни швидкості ультразвуку, асиметрію електронно-акустичних каналів, необхідність встановлення прямих ділянок трубопроводу значної довжини до і після перетворювача [9, 10].

Досягнення високої точності вимірювання при застосуванні одноканальних вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ) можливе лише за умови рівномірного симетричного профілю швидкостей. За реальних умов експлуатаційного використання це є доволі складною задачею, що потребує врахування багатьох факторів. Для зменшення впливу асиметрії потоку доцільніше використовувати ВПВ з декількома вимірювальними каналами [12].

Недоліками багатоканальних ВПВ є похибки вимірювання через час затримки в електронних вузлах, гідродинамічні похибки спричинені місцевими опорами, похибки через додаткове спотворення поля швидкостей у зоні вимірювання [9, 13, 14].

Альтернативою багатоканальному вимірюванню є застосування перетворювача зі складною траєкторією ультразвукового променя, де зондуєчий імпульс на шляху від випромінювача до

приймача сигналу один або кілька разів відбивається від стінки вимірювального тракту. У такому разі відповідно до [4 – 6] можливі наступні схеми: з відбиттям в одній площині (діаметрально), в декількох площинах, з декількома променями.

Порівняно з багатоканальними витратоміри з відбиттям мають певні переваги через меншу кількість п'єзоелектричних перетворювачів, монтаж яких створює додаткову деформацію поля швидкостей на вимірювальній ділянці; меншу чутливість до невеликих випадкових пульсацій та нерівності поля швидкостей потоку; відсутність меж хвилевід-середовище, на яких відбувається заломлення ультразвукового променя. Завдяки останньому чиннику відсутнє кутове зміщення напрямку зондування, спричинене температурними, концентраційними та іншими вимірами в контрольованому середовищі [9].

Недоліками у такому разі постають чутливість до шумів і ускладнена процедура виведення корисного сигналу [9, 11].

Метою роботи є побудова математичної моделі ультразвукового перетворювача витрати зі складною траєкторією вимірювального променя.

#### Математична модель перетворювача витрати

Для дослідження обрано одну з можливих схем багатоканального зондування потоку за допомогою відбитої хвилі, де реалізований час-імпульсний метод вимірювання, що передбачає визначення витрати за різницею часу проходження вимірювального променя за потоком та проти нього (рис. 1). Ультразвуковий промінь, створений п'єзоелектричним перетворювачем 1, прямує у напрямку п'єзоелектричного перетворювача 6, що сприймає його. На шляху між перетворювачами 1 і 6 промінь відбивається в точках 2, 3, 4 та 5. Далі перетворювач 6 створює новий промінь та спрямовує його у зворотному напрямку. Для фільтрації та очищення від шумів вимірюваного ультразвукового сигналу ділянки 1-2 та 5-6 побудовані перпендикулярно потоку [6, 9].

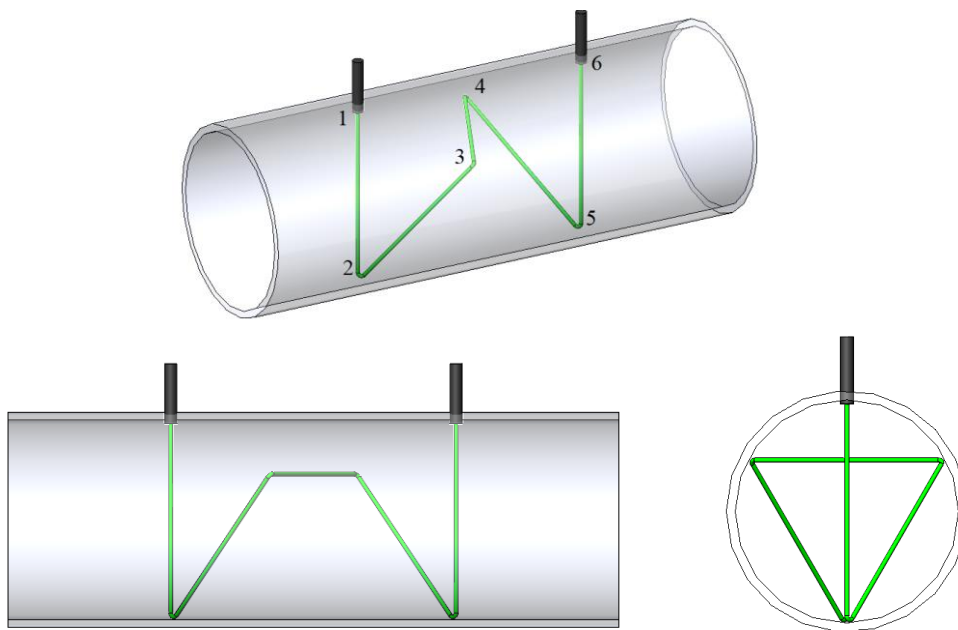


Рис. 1. Схема з використанням відбитої хвилі для зондування по трьох хордах [4]

У випадку застосування ВПВ з відбиттям витрата визначається відповідно до виразу [6, 9]

$$q_v = kS \sum w_i v_i, \quad (1)$$

де  $k$  – гідродинамічний коефіцієнт, значення якого залежить від режиму течії та наявних гідравлічних опорів;  $S$  – площа поперечного перерізу;  $w_i$  – ваговий коефіцієнт за  $i$ -ю ділянкою променя;  $v_i$  – швидкість за  $i$ -ю ділянкою променя.

Для кожної ділянки траєкторії вимірювального променя звукові коливання проходять у вимірюваному середовищі шлях довжиною  $L$  під кутом

$\alpha$ . У такому випадку проекція швидкості потоку  $v$  на шлях  $L$  визначається як  $v = v_L \cos \alpha$ , де  $v_L$  – середня швидкість потоку за вимірювальним шляхом  $L$ . Якщо акустичні коливання спрямовані за напрямом потоку, то час  $\tau_{за}$  проходження ними відстані  $L$  визначається виразом

$$\tau_{за} = \frac{L}{(c + v_L \cos \alpha)}, \quad (2)$$

де  $c$  – швидкість поширення акустичних коливань у нерухомому середовищі.

При зворотному напрямку акустичних коливань час  $\tau_{\text{проти}}$  проходження ними тієї ж відстані окреслюється виразом

$$\tau_{\text{проти}} = \frac{L}{(c - v_L \cos \alpha)}. \quad (3)$$

Визначимо швидкість звуку через час проходження сигналу за потоком з (2)

$$c = \frac{L}{\tau_{\text{за}}} - v_L \cos \alpha, \quad (4)$$

і проти потоку з (3)

$$c = \frac{L}{\tau_{\text{проти}}} + v_L \cos \alpha. \quad (5)$$

Швидкість потоку вимірюваного середовища отримаємо прирівнюванням правих частин (4) та (5)

$$v_L = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left( \frac{1}{\tau_{\text{за}}} - \frac{1}{\tau_{\text{проти}}} \right)$$

або

$$v_L = \frac{L(\tau_{\text{проти}} - \tau_{\text{за}})}{2 \cos \alpha \tau_{\text{за}} \tau_{\text{проти}}} = \frac{L \Delta \tau}{2 \cos \alpha \tau_{\text{за}} \tau_{\text{проти}}}. \quad (6)$$

Для визначення швидкості звуку з (4) та (5) виражаємо швидкість потоку і прирівнюємо праві частини

$$c = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{\tau_{\text{за}}} + \frac{1}{\tau_{\text{проти}}} \right) = \frac{L(\tau_{\text{за}} + \tau_{\text{проти}})}{2 \tau_{\text{за}} \tau_{\text{проти}}}.$$

Час проходження сигналу траєкторією 1-6 є сумою складових, що відповідають часу проходження променем окремих ділянок траєкторії.

Оскільки на ділянках 1-2 та 5-6 сигнал проходить перпендикулярно потоку, то час проходження сигналу становить  $\tau_{1-2} = \tau_{2-1} = \tau_{5-6} = \tau_{6-5} = \tau_0$  і визначається

$$\tau_0 = \frac{L_d}{c},$$

де  $L_d$  – відстань між випромінювачем 1 та відбивачем 2, приймачем 6 та відбивачем 5 (рис. 1).

Оскільки вимірювальні промені проходять на певній відстані від центру визначена швидкість  $v_L$  буде відрізнятись від середньої за вимірювальним перерізом на величину  $K_g$ , що визначається експериментальним шляхом.

Відрізки 2-3, 3-4 та 4-5 є рівними та рівновіддаленими від центру, тому вираз (1) з урахуванням (6) набуває виду

$$q_v = 3kSK_g v_{2-3} = 3kK_g \frac{\pi D^2}{4} \frac{L_{2-3}}{2 \cos \alpha} \frac{\Delta \tau_{2-3}}{\tau_{2-3} \tau_{3-2}}.$$

Сигнал на ділянках 2-3, 3-4 та 4-5 проходить однаковий за довжиною шлях по рівновіддалених від центру хордах, час проходження сигналу цими ділянками однаковий і визначається за потоком

$$\tau_{2-3} = \frac{\tau_{1-6} - \tau_{1-2} - \tau_{5-6}}{3} = \frac{\tau_{1-6} - 2\tau_0}{3}, \quad (7)$$

проти потоку

$$\tau_{3-2} = \frac{\tau_{6-1} - \tau_{2-1} - \tau_{6-5}}{3} = \frac{\tau_{6-1} - 2\tau_0}{3}, \quad (8)$$

де  $\tau_{1-6}$  та  $\tau_{6-1}$  – час проходження акустичного сигналу за потоком та проти нього.

Враховуючи (7) і (8), для різниці часу проходження сигналу за потоком та проти нього можна записати

$$\Delta \tau_{2-3} = \tau_{3-2} - \tau_{2-3} = \frac{\tau_{6-1} - \tau_{1-6}}{3}. \quad (9)$$

Запишемо добуток часу проходження сигналу за потоком (7) та проти нього (8) на ділянці 2-3 через загальний час

$$\tau_{2-3} \tau_{3-2} = \frac{\tau_{1-6} \tau_{6-1} - 2\tau_0 (\tau_{1-6} + \tau_{6-1}) + 4\tau_0^2}{9}. \quad (10)$$

Остаточно з врахуванням (9) та (10) характеристика перетворення досліджуваного ультразвукового перетворювача витрати зі складною траєкторією вимірювального променя набуває виду

$$q = kK_g \frac{\pi D^2}{4} \frac{L_{2-3}}{2 \cos \alpha} \left( \frac{9(\tau_{6-1} - \tau_{1-6})}{\tau_{1-6} \tau_{6-1} - 2\tau_0 (\tau_{6-1} + \tau_{1-6}) + 4\tau_0^2} \right).$$

Використання прикладних програмних застосунків обчислювальної гідродинаміки дозволяє здійснити імітаційне моделювання роботи перетворювача витрати та дослідити явища, що відбуваються в ньому.

Із застосуванням імітаційного моделювання, реалізованого на підґрунті методу кінцевих елементів, авторами відтворено досліджуваній ВПВ, що дозволило виявити особливості роботи ультразвукового перетворювача витрати зі складною траєкторією вимірювального променя (рис. 2).

Результати моделювання, проведеного для діапазону вимірюваних витрат за умов ідеального сформованого профілю швидкості потоку газу у вхідному перерізі перетворювача, виявили, що елементи вимірювальної схеми (відбивачі променя) не спричиняють суттєвого спотворення профілю потоку та траєкторії вимірювального променя.

## Висновки

Завдяки високим метрологічним характеристикам широкого застосування у практиці вимірювання природного газу набувають прилади, що

базуються на ультразвукових методах вимірювання витрати.

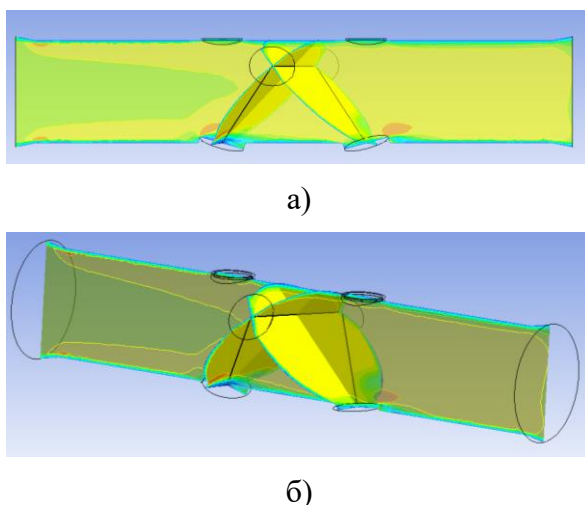


Рис. 2. Поле швидкостей за номінальної витрати: а) за протяжністю гідравлічного каналу; б) у площинах проходження вимірювального променя

Висока точність вимірювань у такому разі досягається застосуванням перетворювачів витрати з декількома вимірювальними каналами, суттєвим недоліком яких є додаткове спотворення поля швидкостей у зоні вимірювання.

Авторами проведено дослідження перетворювача зі складною траєкторією ультразвукового променя, де зондуючий імпульс на шляху від випромінювача до приймача сигналу кілька разів відбивається від стінки вимірювального тракту в різних площинах.

Характерною ознакою цього методу є багатоканальність вимірювання при застосуванні лише однієї пари п'єзоелектричних перетворювачів, на відміну від класичних багатоканальних перетворювачів витрати, коли для кожного вимірювального каналу використовується окрема пара п'єзоелектричних перетворювачів. Отримано аналітичний вираз характеристики перетворення.

Результати імітаційного моделювання здійсненого за допомогою програмного застосування обчислювальної гідродинаміки дозволили з'ясувати особливості роботи ультразвукового перетворювача витрати зі складною траєкторією вимірювального променя.

Перспективою подальшої роботи є імітаційне моделювання роботи ультразвукового перетворювача витрати з багатократним відбиттям вимірювального променя за умов асиметричного спотвореного профілю потоку.

#### Література

[1] М. П. Андрішин, С. О. Канєвський, О. М. Карпаш, Я. С. Марчук, І. С. Петришин, А. А. Руд-

нік, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський, *Вимірювання витрати та кількості газу: довідник*. О. М. Карпаш, Ред. Івано-Франківськ, Україна: ПП «Сімик», 2004.

[2] Е. А. Шорников, *Расходомеры и счетчики газа, узлы учета. Справочник*. СПб: Политехника, 2003.

[3] Й. Й. Білінський, М. О. Стасюк, М. В. Гладисевський, “Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та їхня класифікація”, *Автоматика та інформаційно-вимірювальна техніка. Наукові праці ВНТУ*, № 1, с. 1-11, 2015.

[4] ISO 12242:2012(E). Measurement of fluid flow in closed conduits. – Ultrasonic transit-time meters for liquid.

[5] ISO 17089-1:2019. Measurement of fluid flow in closed conduits. – Ultrasonic meters for gas – Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.

[6] ISO 17089-2:2012. Measurement of fluid flow in closed conduits. – Ultrasonic meters for gas – Part 2: Meters for industrial applications.

[7] А. В. Писарець, С. В. Писарець, “Автоматизовані системи передачі показань від приладів обліку енергоносіїв. Частина 1”, *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 59(1), с. 95 – 101, 2020. DOI: 10.20535/1970.59(1).2020.210037

[8] А. В. Писарець, С. В. Писарець, “Автоматизовані системи передачі показань від приладів обліку енергоносіїв. Частина 2”, *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 60(2), с. 79 – 86, 2020. DOI: 10.20535/1970.60(2).2020.221452

[9] А. Ш. Киясбейли, А. М. Измайлов, В. М. Гуревич, *Частотно-временные ультразвуковые расходомеры и счетчики*. Москва: Машиностроение, 1984.

[10] П. П. Кремлевский, *Расходомеры и счетчики количества. справочник*. Ленинград: Машиностроение, 1989.

[11] 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.

[12] Ф. Д. Матіко, В. І. Роман, “Вплив просторового розташування ультразвукового витратоміра на точність вимірювання витрати спотвореного потоку”, *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, Вип. 28-29, с. 77-82, 2017.

[13] І. А. Гришанова, І. В. Коробко, П. М. Погребний, “Визначення топологій вимірювальних хорд ультразвукових перетворювачів витрати рідини”, *Методи та прилади контролю якості*, № 1 (34), с. 38-45, 2015.

[14] Pamela Moore, Gregor Brown, & Brian Stimpson, “Ultrasonic transit-time flowmeters modelled

with theoretical velocity profiles: Methodology”,  
*Measurement Science and Technology*. 11, pp.  
1802-1811, 2000.

Doi: 10.1088/0957-0233/11/12/321.

UDC 621.121

**A. Pysarets, O. Drachuk**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,  
Kyiv, Ukraine*

### OPERATION FEATURES OF AN ULTRASONIC FLOW TRANSDUCER WITH A COMPLEX TRAJECTORY OF THE MEASURING PATH

To measure the flowrate of fuel and energy resources, different methods are used, which determine the range of measuring instruments. Instruments based on ultrasonic measurement methods are widely used in measurement practice due to the provision of high accuracy, a wide range of measured flowrates, the absence of additional pressure losses and the design simplicity. Such instruments are easily integrated into automated readout systems for collecting and transmitting information. The asymmetry of the measured medium flow is a significant problem in the use of single-channel ultrasonic meters. This issue is successfully solved by using multi-channel flow transducers.

The disadvantages of multi-channel ultrasonic flow transducers include a significant complication of the hydraulic channel design, the need to use more complex mathematical algorithms for processing the obtained output signal. This requires the use of high performance electronic elements, first of all microprocessors.

The use of a transducer with multiple reflection of one measuring beam from the wall of the measuring path acts as an alternative to multi-channel measurement.

The aim of the work is to create a mathematical model of an ultrasonic flow transducer with a complex measuring path trajectory. For research, a scheme with sounding along three chords was chosen, which implements the time-pulse measurement method, it provides for determining the flow rate by the difference in the time of passage of the measuring path along the flow and against it. In this case, the projections of the chords on the cross section of the measuring section create an equilateral triangle. An analytical expression for the conversion response is obtained for the case of several beam reflections in different planes.

The authors reproduced the hydraulic part of the investigated flow transducer using simulation modeling implemented on the basis of the finite element method. Transducer's operation simulation in the range of measured flow rates in the conditions of an ideally formed profile of the gas flow velocity in the transducer inlet cross-section has been carried out. The results obtained confirmed the absence of influence of the measuring circuit elements (beam reflectors) on the flow profile and the measuring beam trajectory.

**Keywords:** gas; flow transducer; beam reflection; ultrasonic flow transducer; conversion response.

*Надійшла до редакції  
12 квітня 2022 року*

*Рецензовано  
05 травня 2022 року*