

ВПЛИВ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ГАЗОВОГО ПОТОКУ НА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИМ ВИТРАТОМІРОМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено вплив турбулентності газового потоку на алгоритмічні процедури визначення часу поширення ультразвукового сигналу в ультразвукових витратомірах. Проаналізовано основні джерела похибок, що виникають на етапах цифрової обробки сигналів, та запропоновано підходи до їх мінімізації з використанням статистичних, кореляційних і адаптивних алгоритмів.

Ключові слова: *ультразвуковий витратомір, турбулентність, цифрова обробка сигналів, алгоритм, корекція похибок, статистичне усереднення.*

Abstract

The paper investigates the influence of gas flow turbulence on algorithmic procedures for time-of-flight estimation in ultrasonic flow meters. The main error sources arising during digital signal processing are analyzed, and approaches for their minimization using statistical, correlation, and adaptive algorithms are proposed.

Keywords: *ultrasonic flowmeter, turbulence, digital signal processing, algorithm, error correction, statistical averaging.*

Вступ

Сучасні ультразвукові витратоміри природного газу представляють собою складні інформаційно-вимірювальні системи, у яких точність вимірювання витрати значною мірою визначається ефективністю алгоритмів обробки ультразвукових сигналів [1]. За умов турбулентного режиму потоку газу випадкові флуктуації швидкості призводять до стохастичних змін часу проходження сигналу, що ускладнює алгоритмічну оцінку параметрів потоку та потребує застосування методів цифрової фільтрації і статистичного аналізу. Тому продовжується пошук нових шляхів зменшення або повного усунення тих чи інших похибок ультразвукових витратомірів.

Аналіз дослідження

У турбулентному режимі течії миттєва швидкість газу змінюється випадковим чином у просторі та часі. Це безпосередньо відображається на часі проходження ультразвукового імпульсу між випромінювачем і приймачем. Час поширення сигналу можна подати у вигляді суми середньої та флуктуаційної складових [2]:

$$t(t) = \bar{t} + t'(t),$$

де \bar{t} — середній час проходження ультразвукової хвилі;

$t'(t)$ — випадкова складова, зумовлена турбулентними пульсаціями швидкості потоку.

У реальних трубопроводах швидкісний профіль газового потоку суттєво відрізняється від ідеалізованого рівномірного. Для турбулентної течії широко використовується степенева апроксимація профілю швидкості:

$$\frac{v(r)}{v_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n},$$

де R — радіус труби,

r — радіальна координата,

n — показник степеня, що залежить від числа Рейнольдса та шорсткості внутрішньої поверхні труби.

Алгоритм часово-імпульсних витратомірів, реалізований у цифровому сигнальному процесорі витратоміра, фактично оцінює не миттєвий, а усереднений за часом параметр, що обчислюється на основі кореляційної обробки прийнятих ультразвукових імпульсів. За наявності спотвореного швидкісного профілю систематична похибка визначення середньої швидкості потоку може бути подана як:

$$\varepsilon_p = \frac{V_{\text{TOF}} - V_m}{V_m},$$

де V_{TOF} — швидкість, визначена часово-імпульсним методом,
 V_m — істинна середня швидкість газу в трубопроводі.

Турбулентні пульсації призводять до зниження відношення сигнал/шум та кореляції між прийнятим сигналом і еталонною формою, що безпосередньо впливає на стабільність алгоритмів визначення часу приходу імпульсу. Загасання сигналу на акустичному шляху описується залежністю [3, 4]:

$$A(L) = A_0 e^{-\alpha L},$$

де A_0 — початкова амплітуда сигналу,

L — довжина акустичного шляху,

$\alpha = \alpha_v + \alpha_t$ — сумарний коефіцієнт загасання, що враховує в'язкі та турбулентні втрати.

Для зменшення впливу турбулентності на результати вимірювань застосовуються багатопроменеві схеми з алгоритмічним просторовим усередненням, часові статистичні методи обробки даних, кореляційні та фазові алгоритми оцінювання, а також адаптивні цифрові фільтри.

Проведено моделювання у середовищі **SOLIDWORKS Flow Simulation** профілів потоку, використовуючи широкий діапазон швидкостей при використанні стандартних місцевих опорів. Встановлено, що при наявності місцевих опорів і низьких швидкостях потоку похибка не збільшується, а при швидкостях більше 5м/с починається суттєве збільшення похибки вимірювання, оскільки для визначення середньої швидкості потік у використується припущення, що існує рівномірний профіль, що призводить до систематичної похибки. Це підтверджує істотну відмінність між ламінарним і турбулентним режимами потоку. Таким чином, встановлено, що при високих швидкостях потоку необхідно застосовувати корекційні коефіцієнти та удосконалені алгоритми вимірювання.

Висновки

В роботі показано, що турбулентність газового потоку суттєво впливає на алгоритмічні процедури обробки ультразвукових сигналів та формування результатів вимірювання. Встановлено, що похибки ультразвукового витратоміра доцільно класифікувати на: похибки, що компенсуються конструктивними рішеннями; похибки, що коригуються алгоритмічно з урахуванням виміряних параметрів середовища; похибки, що мінімізуються статистичною обробкою даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Stetsenko A., Bilynsky Y. Overview of Current Trends in the Development of Ultrasonic Gas Flow Meters. ІМЕКО World Congress, 2024.
2. American Gas Association. Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters. AGA Report No.9, 2007.
3. Lynnworth L. C. Ultrasonic Measurements for Process Control. Academic Press, 1989.
4. Bendat J. S., Piersol A. G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley, 2010.

Білинський Йосип Йосипович – д-р т. н. професор кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Yosyp.bilynsky@gmail.com

Стеценко Андрій Анатолійович — канд. техн. наук, докторант кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Andrey@energo.kh.ua

Дзись Віктор Григорович - — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: dzisvg@gmail.com

Bilynsky Yosyp Yosypovych - Dr. Sc. (Eng.), professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Yosyp.bilynsky@gmail.com

Stetsenko Andrii Anatoliyovych - Candidate Technical of Sciences, doctoral student of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Andrey@energo.kh.ua

Dzis Viktor Grygorovych- Candidate Technical of Sciences, docent of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dzisvg@gmail.com