

І. А. Дудатьєв¹
Д. М. Компанець¹

МЕТОД КОНТРОЛЮ ПЛИННОГО СЕРЕДОВИЩА ТА СПОСІБ ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДОВОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТОМІРА КОРІОЛІСА

¹Вінницький національний технічний університет

Метою роботи є підвищення точності вимірювання масової витрати та густини рідини завдяки контролю параметрів потоку плинного середовища та оцінювання складової невизначеності результатів вимірювання, зумовленою плинністю параметрів вимірюваного потоку рідини, характеристики якої відмінні від характеристик води. Для цього проведено аналіз сучасних досліджень. За результатами аналізу будови витратоміра Коріоліса та рівняння перетворення засобу вимірювальної техніки проаналізовано фактори, зміна яких під час вимірювань впливає на точність вимірювання витратоміром масової витрати та густини рідини. За результатами аналізу виявлено основні параметри потоку, які знижують точність вимірювання витратоміра Коріоліса та спричиняють додаткову невизначеність вимірювання. Описано бюджет складових невизначеності вимірювання і розраховані додаткові складові невизначеності результатів вимірювання та включено до бюджету складові невизначеності, які враховують фактори зміни швидкості потоку та характеру течії потоку рідини, маса та густина якого вимірюються витратоміром Коріоліса. Досліджено такі параметри: зміна швидкості потоку, зміна тиску у трубопроводі перед і за витратоміром та зміна температури. Розроблено метод контролю параметрів плинного середовища. Запропоновано критерії контролю плинного середовища в залежності від індексу пульсації.

Описано спосіб оцінювання складової невизначеності результатів вимірювання обумовленою плинністю середовища і зміною швидкості та тиску вимірюваного потоку рідини, характеристики якої відмінні від характеристик води. Запропоновано спосіб змінення параметрів потоку рідини, що дозволить контролювати виконання вимірювань за заданих умов та підвищить точність вимірювання масової витрати рідини, характеристики якої відмінні від характеристик води.

Ключові слова: витратомір Коріоліса, автоматизована система наливу, точність, швидкість потоку, тиск, плинне середовище, оцінювання невизначеності результатів вимірювання.

Вступ

З розвитком ринкової економіки та підвищенням вимог до комерційного обліку виникає необхідність удосконалення автоматизованої системи вимірювання витрат рідин. Підвищення вимог до вимірювального контролю, зменшення впливу людського фактора під час технологічного процесу та зменшення складових похибок у вузлах комерційного обліку потребують контролю параметрів потоку рідин, для того щоби результати вимірювання були достовірними. Для вимірювання витрати рідин використовують витратоміри, що використовують різні методи вимірювання. Великої популярності через свої переваги здобули витратоміри Коріоліса (ВК). ВК має високу точність та придатний для вимірювання витрат рідин із густиною та в'язкістю відмінною від води, тому їх використовують для вимірювання витрат таких рідин як: нафтопродукти, спирти, рідини харчової промисловості та інші. Однак, для виконання вимірювань із заданою точністю від виробника, необхідно під час монтажу дотримуватися умов, передбачених виробником [1]. До таких умов належить: встановлення положення витратоміра, довжина прямого трубопроводу перед та за витратоміром, виконання умов необхідного тиску, герметичності у системи та ін. Проте, існують додаткові фактори, які впливають на точність вимірювання витрати плинних середовищ витратоміром

Коріоліса, а саме витрати нафтопродуктів. До таких факторів належать: пульсація потоку, турбулентність потоку, кавітація рідини, поява у рідині газоподібної фракції нафтопродуктів, тиск рідини у трубопроводі та інші, описані в роботі [2]. Прецизійність конкретного ВК можна дізнатись за результатами калібрування, під час якого виконуються вимірювання у лабораторних умовах за використання систем перевірки, виконання усіх необхідних умов згідно з вимогами методики калібрування, тобто в умовах, в яких не допускаються ті фактори, які можуть бути допущені під час використання ВК у технологічному процесі [3]. Також, для здійснення точно заданого наливу та вимірювання витрат під час технологічного процесу використовуються автоматизовані системи наливу (АСН), у складі яких використовується ВК.

АСН призначена для: автоматизованого дозованого наливу, технологічного контролю процесу наливу з вимірюванням параметрів умов наливу, забезпечення сигналізації і блокування процесу наливу у разі виникнення нештатних ситуацій, обробки та передачі облікової інформації, зберігання архівних даних, формування звітів зі зберіганням інформації на електронних носіях.

Проте, на виробництвах, що використовують АСН, у складі яких є ВК для комерційного обліку або у технологічному процесі виготовлення продукції, де вимірюються витрати рідин, властивості яких відмінні від води, а саме нафтопродуктів, з'являється необхідність у додатковому контролі тих факторів, які можуть впливати на точність вимірювання ВК.

Метою роботи є виконання розробки методу контролю зміни швидкості потоку та тиску у трубопроводі, а також розробки способу оцінювання складової невизначеності результатів вимірювання, обумовленою плинністю вимірювального потоку рідини, характеристики якої відмінні від води. Це дасть змогу підвищити точність вимірювання та оцінити з більшою достовірністю невизначеність вимірювання. Для досягнення цієї мети використано дані експериментальних досліджень, виконаних у роботі [4] за допомогою АСН із застосуванням динамічного методу вимірювання маси нафтопродукту.

Результати дослідження

Пульсуючий потік впливає на точність вимірювання, про що зазначено в роботі [4], під час проведення вимірювань необхідно оцінювати складову невизначеності плинності середовища. В цій роботі, описано процеси, що виникають під час проходження вимірюваного потоку, через пряму вимірювальну трубку з усталеними вимушеними коливаннями, а також, рівняння перетворення і математичну модель коливання трубки з потоком. Масова витрата визначається за різницею фаз коливань двох точок, розташованих симетрично відносно точки прикладання вимушеної сили, і має вигляд

$$Q = \frac{C_{\psi} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_k^2} \right)}{2b^2} \Delta t, \quad (1)$$

де Q — масова витрата; C_{ψ} — жорсткість трубки; ω_p — частота вимушених коливань трубки за відсутньої швидкості потоку; ω_k — частота вимушених коливань під дією коріолісових сил під час руху потоку по трубці; b — розмір трубки; Δt — затримка часу між коливаннями двох точок трубки.

З рівняння (1) видно, що частота коливань вимірюваної трубки ω_k змінюється від зміни масової витрати. Зі свого боку масова витрата залежить від швидкості потоку та описується рівнянням

$$Q = \rho S V, \quad (2)$$

де S — площа поперечного перерізу трубки; ρ — густина рідини; V — швидкість потоку.

Математична залежність між зміною швидкості потоку та тиском рідини у трубопроводі може бути виражена за допомогою рівняння Бернуллі. Рівняння Бернуллі описує збереження енергії в потоці рідини [5]. У простій формі рівняння для нестисливого стаціонарного потоку рідини, який не має джерел або стоків енергії, має такий вигляд:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2, \quad (3)$$

де, P_1 та P_2 — тиск рідини на початку та в кінці розглянутої ділянки трубопроводу; ρ — густина рідини; v_1 та v_2 — швидкість потоку на початку та в кінці ділянки трубопроводу; g — прискорення

вільного падіння; h_1 та h_2 — висота рідини над деяким відліком.

Для випадку, коли трубопровід відносно горизонтальний (тобто $h_1 = h_2$), рівняння Бернуллі можна спростити і вивести залежність між зміною тиску та зміною швидкості потоку

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho (\Delta v)^2, \quad (4)$$

де, ΔP — зміна тиску; Δv — зміна швидкості потоку.

З формули випливає, що зміна тиску пропорційна квадрату зміни швидкості потоку рідини.

В роботі [6] описано аналіз дослідження та розрахунку індексу пульсації, що дозволяє визначити допустимий рівень пульсацій, за якого потік можна вважати ще стаціонарним. Індекс пульсацій визначається як відношення різниці максимального і мінімального значень витрати до середньої витрати

$$I_p = \frac{(Q_V)_{\max} - (Q_V)_{\min}}{2(Q_V)_{av}}, \quad (5)$$

де I_p — індекс пульсації; $(Q_V)_{\max}$ — максимальна об'ємна витрата в пульсуючому потоці; $(Q_V)_{\min}$ — мінімальна об'ємна витрата в пульсуючому потоці; $(Q_V)_{av}$ — середнє значення витрати в пульсуючому потоці.

Чутливість засобу вимірювальної техніки, в цьому випадку витратоміра, визначається як відношення зміни вимірюваної величини до зміни витрати [7]. Чутливість витратоміра виражається у вигляді відношення вихідного сигналу до зміни витрати. Чутливість витратоміра розраховується за формулою

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}, \quad (6)$$

де S — чутливість витратоміра; ΔY — зміна вихідної величини; ΔX — зміна витрати, яка відповідає цій зміні вихідної величини.

Через наявність затримки в часі, обумовленої коливаннями двох точок трубки, вираженої у формулі (1), та наявності відмінного від нуля індексу пульсації виникає необхідність врахування чутливості витратоміра для оцінювання невизначеності результатів вимірювання. Проте, прямої залежності між індексом пульсації та чутливістю засобу вимірювання не знайдено. Тому, пропонується метод контролю, коли відома чутливість засобу вимірювання, яка наближається до 1 за конкретний проміжок часу, зі встановленням фіксованого значення індексу пульсації. Як, до прикладу, запропоновано та виконано в роботі [4], коли вимірювання проводилося зі сталою швидкістю потоку з індексом пульсації не більше ніж 0,5 %. За допомогою контролю значення зміни швидкості можна оцінити вплив цієї зміни на точність вимірювання масової витрати.

Відомо декілька способів знаходження максимально та мінімального значення витрати для розрахунку індексу пульсації. Проте, у цій роботі пропонується використати результати вимірювання витрати потоку, отримані впродовж усього часу вимірювання, та розділити їх на рівні відрізки за часом, наприклад, протягом однієї секунди маємо 10 результатів вимірювання. За формулою (5) розраховуємо індекс пульсації.

Бюджет невизначеностей результатів вимірювання витратоміром Коріоліса складається з таких невизначеностей як: стандартна невизначеність за типом А, U_A ; стандартна невизначеність за типом В, обумовлена точністю витратоміра, і заявлена виробником $U_{B\Delta q}$; стандартна невизначеність за типом В обумовлена стабільністю нульової точки $U_{B\Delta \theta}$; стандартна невизначеність за типом В обумовлена роздільною здатністю вихідного сигналу $U_{B\Delta d}$; а також, досліджена у цій роботі динамічна невизначеність, обумовлена наявністю пульсацій, які впливають на характер течії потоку нафтопродуктів та зумовлюють плинність середовища U_D .

Результати вимірювання для оцінювання невизначеності вимірювання використані з роботи [4], вони отриманні за хаотичної зміни витрати маси 5...9 кг/с. Бюджет невизначеностей подано у таблиці.

Для оцінювання складової невизначеності, обумовленої динамічною характеристикою витратоміра, скористаємось результатами дослідження роботи [8], в якій виведено та описано формулу для оцінки динамічної невизначеності результатів вимірювання [9].

Бюджет невизначеностей витратоміра

Вхідні величини	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність, кг	Розподіл ймовірностей	Коефіцієнт впливу, c_i	Внесок в невизначеність, $c_i \cdot U_i$
Q	371,5 кг	1,2476	Нормальний	1	$c_q \cdot U_q$
Δ_q	0,35 %	0,75	Рівномірний	1	$c_{\Delta q} \cdot U_{\Delta q}$
Δ_o	0,005 кг/ч	0,00005	Рівномірний	1	$c_{\Delta o} \cdot U_{\Delta o}$
Δ_d	0,005 кг/ч	0,00005	Рівномірний	1	$c_{\Delta d} \cdot U_{\Delta d}$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність, U_S , кг	Коефіцієнт охоплення		Розширена невизначеність
\bar{Q}	371,5 кг	1,4561	1,96		2,854 кг

За результатами розрахунку, динамічна невизначеність становить 0,377 %.

Комбінована невизначеність вимірювання, розраховується за формулою

$$\tilde{U}_C = \sqrt{\tilde{U}_D^2 + \tilde{U}_S^2}. \quad (7)$$

Сумарна стандартна невизначеність з урахуванням динамічної невизначеності становить 2,02 кг. А отже, розширена невизначеність становить 3,96 кг.

Для перевірки адекватності запропонованого методу оцінювання невизначеності результатів вимірювання порівнюємо їх з розрахованою невизначеністю результатів вимірювання, отриманих за допомогою еталонного обладнання. Результати вимірювань також взяті з роботи [4].

Оцінена розширена невизначеність вимірювання, отриманих у порівнянні з результатами вимірювання еталонного обладнання, становить 3,55 кг. Що підтверджує доцільність оцінювання невизначеності результатів вимірювання з урахуванням динамічної невизначеності.

Рекомендації щодо підвищення точності за рахунок удосконалення АСН. Контролюючи значення індексу пульсації та значення тиску перед і за витратоміром та його зміни можна налаштувати АСН таким чином, щоб система реагувала на вихід за допустимі межі та впливала на динамічні характеристики потоку, використовуючи регульовальні елементи АСН, до прикладу, допоміжні багатопозиційні електромагнітні клапани [10].

Висновки

Зміна параметрів потоку, таких як швидкість потоку та тиск у трубопроводі, під час проведення вимірювання впливає на точність вимірювання витратоміром Коріоліса та на величину невизначеності результатів вимірювання.

Актуалізація питання створення методів контролю параметрів потоку рідин, характеристики яких відмінні від характеристик води, а саме нафтопродуктів, є важливим кроком у підвищенні точності вимірювань.

Результати досліджень можуть бути використані на підприємствах, які застосовують витратоміри Коріоліса у технологічному процесі у складі АСН рідин, в калібрувальних лабораторіях, які виконують роботи з калібрування витратомірів Коріоліса, а також підприємствами, які виконують роботи з розроблення та монтажу систем вимірювання витрат рідин, у складі яких застосовуються витратоміри Коріоліса.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Держспоживстандарт України, «Вимірювання потоку плинного середовища в закритих каналах. Вказівки щодо вибору, установлювання та застосовування коріолісових витратомірів (вимірювання масової витрати, густини та об'ємної витрати,» ДСТУ ISO 10790:2021, 2021.

[2] Н. І. Косач, «Основні принципи застосування коріолісових витратомірів для вимірювання витрати рідини і газу,» *Український метрологічний журнал*, № 1, с. 47-49, 2013.

[3] Держспоживстандарт України, «Динамічні вимірювальні системи для рідин, крім води. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги,» ДСТУ OIML R 117-1:2022, 2022.

[4] О. М. Васілевський, і Д. М. Компанець, «Вплив хаотичної зміни швидкості потоку нафтопродуктів на точність вимірювання витратоміром Коріоліса», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 14-20, 2021.

[5] С. М. Василенко, В. Р. Кулінченко, О. Ю. Шевченко, і В. А. Піддубний, *Гідрогазодинаміка*. Київ, Україна: Кондор, 2016, 676 с.

[6] Ю. Кузьменко, «Експериментально-конструктивні методи удосконалення відтворення одиниць витрати плинних середовищ та забезпечення їх простежуваності.» дис. канд. техн. наук., НАц. ун-т України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, 2017.

[7] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, і В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.

[8] O. Vasilevskyi, et al., "A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices," *Proc., Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, vol. 10808, 108082E, 2018.

[9] О. М. Васілевський, «Оцінка невизначеності вихідних сигналів засобів вимірювальної техніки в динамічних режимах роботи,» *Системи обробки інформації*, № 4 (85), с. 81-84, 2010.

[10] О. М. Васілевський, і Д. М. Компанець, «Контроль параметрів вимірювання тиску системою автоматизованого наливу нафтопродуктів на нафтобазах,» *V. Міжнар. наук. конф. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2019)*, Вінниця, 2019, с. 121.

Рекомендована редколегією журналу «Вісник Вінницького політехнічного інституту»

Стаття надійшла до редакції 20.02.2024

Дудатьєв Ігор Андрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, e-mail: dudatiev.igor@gmail.com ;

Компанець Дмитро Миколайович — аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, e-mail: mr.kompanets@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

I. A. Dudatiev¹
D. M. Kompanets¹

Method of Control of Liquid Environment and Method of Assessing the Uncertainty of Measurement Results of Coriolis Flow Meter

¹Vinnitsia National Technical University

The purpose of the performed work is to improve the accuracy of measuring the mass flow rate and density of a liquid by controlling the flow parameters of a fluid medium and evaluating the uncertainty component of the measurement results due to the fluidity of the parameters of the measured liquid flow, the characteristics of which differ from those of water. For this purpose, we analyzed modern research. Based on the results of the analysis of the Coriolis flow meter structure and the conversion equation of the measuring instrument, the factors that change during measurements affect the accuracy of the flow meter's measurement of mass flow and density of the liquid are analyzed. Based on the results of the analysis, the main flow parameters that reduce the measurement accuracy of the Coriolis flow meter and cause additional measurement uncertainty are identified. The budget of the measurement uncertainty components is described and additional uncertainty components of the measurement results are calculated, and the budget includes uncertainty components that take into account factors of changes in the flow rate and the nature of the flow of the fluid whose mass and density are measured by the Coriolis flow meter. The following parameters are investigated: flow velocity change, pressure change in the pipeline upstream and downstream of the flow meter, and temperature change. A method for controlling the parameters of the fluid medium has been developed. Criteria for controlling the flow medium depending on the pulsation index are proposed. The paper describes a method for estimating the uncertainty component of measurement results due to fluidity of the medium and changes in the velocity and pressure of the measured fluid flow, the characteristics of which differ from those of water. A method for changing the parameters of the fluid flow is proposed, which will allow controlling the measurement under specified conditions and increasing the accuracy of measuring the mass flow rate of a fluid, the characteristics of which are different from water.

Keywords: Coriolis flow meter, automated pouring system, accuracy, flow rate, pressure, fluid medium, uncertainty assessment of measurement results.

Dudatiev Igor A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Information Radioelectronic Technologies and Systems, e-mail: dudatiev.igor@gmail.com ;

Kompanets Dmytro M. — Post-Graduate Student the Chair of Information Radioelectronic Technologies and Systems, e-mail: mr.kompanets@gmail.com