Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОМПАНЕЦЬ ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 681.121

ДИСЕРТАЦІЯ

ДИНАМІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ НАФТОПРОДУКТІВ ВИТРАТОМІРОМ КОРІОЛІСА

152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник: Дудатьєв Ігор Андрійович
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця – 2024

АНОТАЦІЯ

Компанець Д.М. Динамічні вимірювання параметрів потоку нафтопродуктів витратоміром Коріоліса. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 15 – «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» - Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2024.

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності вимірювання масової витрати та густини нафтопродуктів витратоміром Коріоліса.

За результатами дослідження було проведено аналіз переваг і недоліків існуючих методів та засобів вимірювання масової витрати рідини. Також, було проведено аналіз існуючих методів та засобів вимірювання масової витрати за принципом сили Коріоліса, виконано огляд відомих конструкцій, відповідних принципів дії витратомірів Коріоліса та представлено переваги і недоліки кожного з них.

За результатними аналізу сучасних досліджень було обґрунтовано основні параметри потоку, зміна яких під час вимірювання впливає на точність вимірювання витратоміром Коріоліса і становлять додаткові систематичні та випадкові похибки. Оцінено вплив неінформативних параметрів потоку зміна яких під час вимірювання збільшують похибку вимірювання масової витрати та густини потоку витратоміром Коріоліса. Основними неінформативними параметрами є наявність двофазного потоку (рідини-газ), зміна тиску рідини, а також, зміна швидкості потоку в вимірювальних трубках.

В дисертаційній роботі було досліджено вплив зміни швидкості потоку під час вимірювання масової витрати витратоміром Коріоліса. Був проведений аналіз відомих функцій перетворення витратоміру Коріоліса та представлено переваги і недоліки кожного з них. Було розроблено функцію перетворення витратоміру Коріоліса, яка однозначно пов’язує вихідну величину, а саме, масову витрату із вхідними величинами, а саме, площа поперченого перерізу, жорсткість і довжину

ВТ, а також, зміна швидкості та густину потоку. Розроблено математичну модель витратоміру Коріоліса у вигляді диференційного рівняння, яка враховує інерційні властивості витратоміру Коріоліса, що дозволило оцінити динамічні метрологічні характеристики, а саме, імпульсну характеристику, перехідну характеристику, передавальну функцію та амплітудно-частотну характеристику. Оцінено динамічну складову похибки вимірювання. Оцінено систематичні та випадкові похибки витратоміру Коріоліса, а також похибку квантування. Наведено аналітичну та графічну моделі функції перетворення масової витрати витратоміру Коріоліса.

Виконано розрахунок режиму течії за числом Рейнольдса, що одержано через масову витрату. Представлено графіки сигналів одержаних з сенсорів амплітуди коливань витратомірної трубки під час вимірювання із сталою швидкістю потоку, та із хаотично змінною швидкістю потоку. Виконано аналіз отриманих графіків та надано висновки, про вплив зміни швидкості потоку на точність вимірювання масової витрати витратоміру Коріоліса. Описано методи обробки сигналів витратоміру Коріоліса за допомогою перетворення Гілберта, адаптивного режекторного фільтру та дискретним перетворенням Фур’є. Виконано аналіз та наведено переваги і недоліки кожного з них.

Представлено метод оцінювання критерію допустимої зміни швидкості потоку, який представлений у вигляді індексу пульсації. Представлено рівняння складових похибок вимірювання масової витрати витратоміру Коріоліса із врахуванням похибки квантування та похибки обумовленої пульсацією потоку.

Розроблено схему функціональну мікропроцесорну системи інформаційно-вимірювальних каналів витратоміру Коріоліса, яка включає в себе вимірювальні канали масової витрати потоку рідини, густини рідини, температури, а також додатковий вимірювальний канал тиску. Описано переваги використання додаткового вимірювального каналу тиску. Представлено огляд відомих засобів вимірювання тиску. Вибрано метод та засіб вимірювання тиску із необхідною точністю та швидкодією, що використаний у експериментальній установці.

Розроблено схему експериментальної установки для дослідження впливу

зміни параметрів потоку рідини. Експериментальна установка складається з: насосу, клапану з електроприводом, адаптерів, клапану ручного, конструкції наливу, витратоміру Коріоліса, зразкових та допоміжних засобів вимірювання (мірник зразковий, вага для статичного зважування, ареометри для нафтопродуктів, термометр скляний), мікроконтролеру, інтерфейсу зв'язку, персонального комп'ютеру, регулюючої заслінки, сепаратору газоподібної фракції, сенсору тиску.

Проведено експериментальне дослідження на вплив зміни параметрів потоку нафтопродуктів, а саме дизелю та бензину. Досліджено наступні параметри: зміна швидкості потоку та зміна тиску у трубопроводі за витратоміром.

Виконано вимірювання масової витрати, об'ємної витрати, густини та температури потоку витратоміром Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу при індексі пульсації значення якого не перевищує 0,001. Оцінено систематичну та випадкову похибки результатів вимірювання за каналом вимірювання масової витрати, об'ємної витрати, густини та температури.

За результатами експерименту похибка вимірювання, за каналом вимірювання масової витрати для потоку бензину та дизельного палива становить 0,02 % < 0,13 %, а за каналом вимірювання об'ємної витрати для потоку бензину становить 0,03 % < 0,19 %, а для потоку дизельного палива становить 0,04 % < 0,19 %. Збіжність результатів вимірювання за каналом вимірювання масової витрати бензину становить 0,029% < 0,05%, а дизельного палива становить 0,034% < 0,05%.

Цей експеримент підтверджує вимірювання масової витрати, об'ємної витрати та густини бензину вибраним витратоміром Коріоліса, в межах допустимої похибки.

Виконано вимірювання масової витрати, об'ємної витрати, густини та температури потоку витратоміром Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу при індексі пульсації значення якого не перевищує 0,1. Оцінено систематичну та випадкову похибки результатів вимірювання за каналом вимірювання масової витрати, об'ємної витрати, густини та температури.

За результатами експерименту похибка вимірювання, за каналом

вимірювання масової витрати для потоку бензину становить 0,42 % < 0,13 %, а для потоку дизельного палива становить 0,15 % > 0,13 %, а за каналом вимірювання об’ємної витрати для потоку бензину становить 0,58 % < 0,19 %, а для потоку дизельного палива становить 0,20 % < 0,19 %. Збіжність результатів вимірювання за каналом вимірювання масової витрати бензину становить 0,31% < 0,05%, а дизельного палива становить 0,12% < 0,05%.

Цей експеримент підтверджує вплив зміни швидкості потоку під час вимірювання масової витрати, об’ємної витрати та густини бензину вибраним витратоміром Коріоліса. Похибка вимірювань поза межами допустимої похибки.

Проведено порівняння результатів вимірювання масової витрати при індексі пульсації, значення якого не перевищує - 0,001 із результатами вимірювання масової витрати при індексу пульсації значення якого не перевищує - 0,1. За результатами аналізу, точність вимірювання масової витрати витратоміру Коріоліса із застосуванням регулюючого пристрою збільшилась для бензину у 3 разу, а для дизельного палива у 2 рази, а також збіжність результатів вимірювання відповідають допустимим значенням.

Основні фізичні та хімічні властивості бензину та дизелю були врахуванні, а саме: густина при 20°С, кінетична в’язкість при 20°С, середній коефіцієнт стиснення при 50МПа і 20°С, початок кипіння, октанове число.

Експериментально підтверджено вплив хаотичної та неконтрольованої зміни параметрів потоку нафтопродуктів на точність вимірювання витратоміром Коріоліса. Розроблено межі контролю параметрів потоку, що змінюються під час вимірювання та представлено методи обробки результатів вимірювання, за допомогою яких можливо підтвердити виконання вимірювань в заданих межах.

Наведено бюджет невизначеності результатів вимірювання із врахуванням складової невизначеності обумовленої пульсацією потоку вираженої через індекс пульсації.

Описано бюджет складових невизначеності вимірювання та розраховані додаткові складові невизначеності результатів вимірювання та включені до бюджету складових невизначеності, які враховують фактори зміни швидкості

потоку та характеру течії потоку рідини, масову витрату та густину якого вимірюються витратоміром Коріоліса.

Удосконалено методику повірки витратомірів Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу із розрахунком систематичних та випадкових похибок.

Надано рекомендації та допустимі значення критерію зміни параметрів потоку рідини, які дозволять контролювати виконання вимірювань за заданих умов, що підвищить точність динамічних вимірювань.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- удосконалено математичну модель засобу динамічних вимірювань, у вигляді диференційного рівняння, яка порівняно з відомими враховує зміну швидкості потоку;
- вперше розроблено та оцінено критерій допустимого значення зміни параметрів потоку рідини, відповідність числовому значенню якого забезпечує задану точність, а при перевищені цього числового значення, за допомогою регулюючих пристроїв забезпечується зміна параметрів потоку до нормованого значення, що дозволило підвищити точність вимірювання масової витрати в 3 рази для бензину та в 2 рази для дизельного палива;
- отримала подальший розвиток методика повірки витратоміру Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу нафтопродуктів, як на відміну від відомих враховує критерій індексу пульсації потоку нафтопродуктів, а саме, дизелю та бензину.

Ключові слова: витратомір Коріоліса, динамічні вимірювання, вимірювальний канал, вимірювальний перетворювач, квантування, частота, функція перетворення, швидкість потоку, масова витрата, густина, нафтопродукти, динамічні та статичні метрологічні характеристики, систематичні та випадкові похибки, невизначеність результатів вимірювань, автоматизована система наливу.

ABSTRACT

Kompanets D.M. Dynamic Measurements of Petroleum Product Flow Parameters Using Coriolis Flow Meter – A Qualification Scientific Paper as a Manuscript.

Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Field of Knowledge 15 - "Automation and Instrumentation" in the specialty 152 - "Metrology and Information-Measuring Technology " - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2024.

The aim of this dissertation is to increase the accuracy of measuring the mass flow rate and density of petroleum products using Coriolis flow meter.

The research includes an analysis of advantages and disadvantages of the existing methods and technologies for measuring liquid mass flow. Additionally, it reviews the existing Coriolis force-based measurement methods, examines various designs and operational principles of Coriolis flow meters, and presents the benefits and drawbacks of each.

According to the analysis of modern research results, the main parameters of the flow, changes of which during the measurement affect the accuracy of the measurement with Coriolis flow meter and constitute additional systematic and random errors, were substantiated. The impact of non-informative flow parameters, whose variations during measurement increase the error in mass flow and density measurements with Coriolis flow meter, is evaluated. The main non-informative parameters are the presence of a two-phase flow (liquid-gas), a change in liquid pressure, and a change of the flow rate in the measuring tubes.

In the dissertation, the effect of changing flow rates during mass flow measurement with Coriolis flow meter was investigated. An analysis of the known Coriolis flow meter conversion functions was performed, highlighting the advantages and disadvantages of each. A new transformation function for the Coriolis flow meter was developed, which unambiguously relates the output quantity (mass flow rate) to input quantities such as cross-sectional area, stiffness and length of the measuring tubes, as well as changes in velocity and flow density. A mathematical model of the Coriolis flow meter in the form of a differential equation was developed, taking into account the inertial properties of

Coriolis flow meter. This model allowed the evaluation of dynamic metrological characteristics, including the impulse response, transient response, transfer function, and amplitude-frequency response. The dynamic component of the measurement error was estimated, and systematic, random, and quantization errors of Coriolis flow meter were evaluated. Both analytical and graphical models of the mass flow conversion function of Coriolis flow meter are presented in the work.

The flow regime was calculated based on the Reynolds number, derived from the mass flow rate. Graphs of the signals obtained from the sensors of the amplitude of oscillations of the flow-measuring tube during measurement with a constant flow rate and with a randomly variable flow rate, are presented. These graphs were analyzed, and conclusions were drawn about the impact of changing flow rates on the accuracy of mass flow rate measurements with a Coriolis flow meter. Methods for processing Coriolis flow meter signals using the Hilbert transform, an adaptive rejection filter, and a discrete Fourier transform are described, along with an analysis of their advantages and disadvantages respectively.

The method for evaluating the criterion of admissible change in flow rate, presented as a pulsation index. The equations for the component errors in mass flow measurement of the Coriolis flow meter are provided, accounting for both quantization error and errors caused by flow pulsation.

A scheme for the functional microprocessor system of the information and measurement channels of the Coriolis flow meter has been developed. This system includes measurement channels for liquid mass flow rate, liquid density, temperature, and an additional pressure measurement channel. The advantages of incorporating an additional pressure measurement channel are described. An overview of known pressure measurement methods is presented, and the method and instruments used for pressure measurement with the required accuracy and speed in the experimental setup were selected.

A scheme for an experimental setup to research the effect of changing liquid flow parameters has been developed. The experimental installation consists of a pump, an electric valve, adapters, a manually operated valve, a pouring structure, a Coriolis flow

meter, sample and auxiliary measuring devices (a reference measuring cup, a scale for static weighing, a density meter for petroleum products, a glass thermometer), a microcontroller, an interface for connection, a personal computer, a variable area opening, a gas fraction separator, and a pressure sensor.

An experimental study was conducted on the influence of changes in the flow parameters of petroleum products, specifically diesel and gasoline. The research focused on the variations in flow rate and pressure within the pipeline as measured with the flow meter.

Mass flow rate, volume flow rate, density, and flow temperature were measured with Coriolis flow meter as part of an automated pouring system with a pulsation index value of no more than 0.001. The systematic and random errors of the measurement results for the mass flow, volume flow, density, and temperature measurement channels were estimated.

According to the results of the experiment, the measurement error for the mass flow measurement channel for gasoline and diesel fuel is 0.02% < 0.13%, and for the volume flow measurement channel, it is 0.03% < 0.19% for gasoline and 0.04% < 0.19% for diesel fuel. The convergence of measurement results by the mass flow measurement channel is 0.029% < 0.05% for gasoline and 0.034% < 0.05% for diesel fuel.

This experiment validates the measurement of mass flow rate, volume flow rate, and density of gasoline with the selected Coriolis flow meter, within acceptable limits of error.

Mass flow rate, volume flow rate, density, and flow temperature were measured using a Coriolis flow meter as part of an automated pouring system with a pulsation index of no more than 0.1. The systematic and random errors of the measurement results for the mass flow, volume flow, density, and temperature measurement channels were estimated.

According to the results of the experiment, the measurement error for the mass flow measurement channel for gasoline is 0.42% < 0.13%, and for the diesel fuel is 0.15% > 0.13%, and for the volume flow measurement channel for gasoline is 0.58% < 0.19%, and for diesel is 0.20% < 0.19%. The convergence of measurement results by the mass

flow measurement channel of gasoline is 0.31% < 0.05%, and diesel fuel is 0.12% < 0.05%.

This experiment confirms the accurate measurement of mass flow rate, volume flow rate, and density of gasoline with the selected Coriolis flow meter, within the acceptable limits of error.

The results of mass flow measurement at a pulsation index not exceeding -0.001 and those at a pulsation index not exceeding -0.1 have been compared. The analysis revealed that the accuracy of mass flow measurement with Coriolis flow meter using a regulating device increased threefold for gasoline and twofold for diesel fuel. Additionally, the convergence of the measurement results corresponds to permissible values.

The main physical and chemical properties of gasoline and diesel were taken into account, namely: density at 20°C, kinetic viscosity at 20°C, average compression ratio at 50 MPa and 20°C, boiling point, octane number.

The experimental confirmation of the impact of chaotic and uncontrolled changes in the parameters of petroleum product flow on the accuracy of measurement with Coriolis flow meter has been established. Limits for controlling flow parameters that fluctuate during measurement have been developed, and methods for processing measurement results have been presented. These methods enable the verification of measurement performance within the specified limits.

The budget of the measurement uncertainty results is provided, considering the uncertainty component due to flow pulsation expressed through the pulsation index.

The budget of measurement uncertainty components is outlined, and additional uncertainty components of the measurement results are calculated and incorporated into the uncertainty budget. These additional components consider such factors as variations in flow rate and the characteristics of the liquid flow being measured with Coriolis flow meter, including mass flow rate and density.

The method for verifying Coriolis flow meters as part of an automated pouring system with the calculation of systematic and random errors has been enhanced.

Recommendations and permissible values for criteria regarding changes in liquid flow parameters are provided. These recommendations enable the monitoring of measurement performance under specified conditions, thereby enhancing the accuracy of dynamic measurements.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

- the improvement of the mathematical model for dynamic measurements, represented by a differential equation, now incorporates variations in flow rate, a feature not addressed in previous models;
- for the first time, a criterion for permissible changes in liquid flow parameters was developed and evaluated. Adherence to this numerical value ensures specified accuracy. When this value is exceeded, regulating devices are employed to normalize flow parameters. This advancement resulted in a threefold increase in mass flow measurement accuracy for gasoline and a twofold increase for diesel fuel;
- the method for checking Coriolis flow meters within automated petroleum pouring systems has been further advanced. Unlike existing methods, it now considers the pulsation index criterion for petroleum product flows, specifically diesel and gasoline.

Key words: Coriolis flow meter, dynamic measurements, measuring channel, measuring transducer, quantization, frequency, transformation function, flow rate, mass flow, density, petroleum products, dynamic and static metrological characteristics, systematic and random errors, uncertainty of measurement results, automated pouring system.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[1] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Вплив хаотичної зміни швидкості потоку нафтопродуктів на точність вимірювання витратоміру Коріоліса», *Вісник ВПІ,* № 1, с. 14-20, 2021. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-14-20.

[2] І.А. Дудатьєв та Д.М. Компанець, «Метод контролю плинного середовища та спосіб оцінювання складової невизначеності результатів вимірювання витратоміра Коріоліса», *Вісник ВПІ,* №1, с. 6-10, 2024. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-172-1-6-10

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у квазіперіодичному виданні, що внесено до міжнародних науково-метричних баз Scopus / WoS:

[3] O. Vasilevskyi, P. Kulakov, D. Kompanets, O. Lysenko, V. Prysyazhnyuk, W. Wójcik and D. Baitussupov. “A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices”, *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018,* 108082E, 2018. https://doi.org/10.1117/12.2501578.

[4] O. Vasilevskyi, V. Didych, A. Kravchenko, M. Yakovlev, I. Andrikevych, D. Kompanets, Y. Danylyuk, W. Wójcik and A. Nurmakhambetov. “Method of evaluating the level of confidence based on metrological risks for determining the coverage factor in the concept of uncertainty”, *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018,* 108082C, 2018. https://doi.org/10.1117/12.2501576.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[5] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Сучасні системи управління автоматизованим наливом нафтопродуктів на нафтобазах. Фактори, що впливають на точність вимірювання» на *IV міжнародну наукову конференцію «Вимірювання,*

контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)», Вінниця, 2017. Режим доступу: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18849/45230.pdf?sequence=2

[6] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Контроль параметрів вимірювання тиску системою автоматизованого наливу нафтопродуктів на нафтобазах» на *V міжнародну наукову конференцію «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2019)»,* Вінниця, 2019. Режим доступу: https://mpa.vntu.edu.ua/fdb/740/main/Abstracts_2019.pdf

[7] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Параметри потоку нафтопродуктів, що впливають на точність вимірювання витратоміру Коріоліса» на *L науково-технічну конференцію підрозділів Вінницького національного технічного університету*, Вінниця, 2021. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2021/paper/download/12914/10846

[8] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Оцінювання невизначеності результатів динамічних вимірювань витратоміром Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу» на *X Всесвітній конгрес ,,Авіація в XXI столітті”* Київ, 2022. Режим доступу: https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/view/8819

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ 17

ВСТУП……..18

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ РІДИН...……..……..…..24

1.1 Огляд відомих методів та засобів вимірювання об’ємної та масової витрати……24

1.1.1 Манометричні витратоміри……..…..25

1.1.2 Тахометричні витратоміри…….....29

1.1.3 Електромагнітні витратоміри…….....32

1.1.4 Ультразвукові витратоміри……34

1.1.5 Теплові витратоміри……37

1.1.6 Інерційні витратоміри…….....39

1.2 Огляд відомих методів та засобів вимірювання масової витрати та густини рідини із використанням ефекту Коріоліса……...41

1.2.1 Витратоміри Коріоліса……41

1.2.2 Методи та засоби вимірювання кута зсуву фаз ……...…….45

1.3 Параметри потоку, що впливають на точність вимірювання масової витрати та густини потоку витратоміру Коріоліса……..50

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1……..56

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ’ЄКТУ ВИМІРЮВАННЯ…….……58

2.1 Математичне моделювання витратоміру Коріоліса ……...58

2.2 Функція перетворення масової витрати та густини витратоміру Коріоліса……61

2.3 Оцінювання похибки квантування……..……64

2.4 Оцінювання динамічних метрологічних характеристик витратоміру Коріоліса……65

2.5 Методи обробки сигналів витратоміру Коріоліса…….....72

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2……..79

РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИТРАТОМІРУ КОРІОЛІСА У СКЛАДІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ НАЛИВУ……80

3.1 Розробка функціональної мікропроцесорної схеми інформаційно-вимірювальної системи витратоміру Коріоліса…….……80

3.2 Методи та засоби вимірювання надлишкового тиску……..……...82

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3……..87

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ НАФТОПРОДУКТІВ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТОМІРУ КОРІОЛІСА……...88

4.1 Розробка установки для експериментальних досліджень впливу зміни параметрів потоку нафтопродуктів на точність вимірювання витратоміром Коріоліса…….....89

4.2 Експериментальне дослідження впливу зміни параметрів потоку нафтопродуктів на точність вимірювання витратоміром Коріоліса…….92

4.3 Експериментальне дослідження із застосуванням удосконаленої інформаційно-вимірювальної системи витратоміру Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу……..97

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4……..…..103

РОЗДІЛ 5 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПОВІРКИ ВИТРАТОМІРУ КОРІОЛІСА У СКЛАДІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ НАЛИВУ. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ДИНАМІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ВИТРАТОМІРУ КОРІОЛІСА……..…..……...104

5.1 Розробка та оцінювання критерію індексу пульсації потоку…….104

5.2 Удосконалення методики повірки витратоміру Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу……....108

5.3 Оцінювання невизначеності результатів вимірювання масової витрати витратоміром Коріоліса……..….117

5.4 Рекомендації щодо підвищення точності динамічних вимірювань витратоміру Коріоліса в умовах змінних параметрів потоку нафтопродуктів…...126

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5……130
ВИСНОВКИ……...…131
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ…….133
Додаток А……..…….140
Додаток Б ……..……..…142
Додаток В ……..……..…143

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

АСН – автоматизована система наливу;

ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач;

ВК – витратомір Коріоліса;

ВТ – вимірювальні трубки;

ДВ – динамічні вимірювання;

ДП – дизельне паливо;

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки;

ІВК – інформаційно-вимірювальний канал;

ІВС - інформаційно-вимірювальна система;

МВ – масова витрата;

НП – нафтопродукт;

НРВ- невизначеність результатів вимірювання;

ОВ – об’ємна витрата;

РО – регулюючий орган;

ПВП – первинний вимірювальний перетворювач;

СТ – сенсор тиску;

ρ, кг/м^3 – густина рідини;

Q_m, кг/год – масова витрата потоку рідини.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

З розвитком ринкової економіки та підвищенням вимог до комерційного обліку виникає необхідність удосконалення автоматизованої системи вимірювання масової витрати (МВ) та об’ємної витрати (ОВ) рідин, у складі яких застосовується витратомір. Підвищення вимог до точності вимірювання, відповідно до зменшення систематичної і випадкової похибок, що виникають під час динамічних вимірювань (ДВ) на вузлах комерційного обліку потребують дослідження впливу зміни параметрів потоку рідин на точність вимірювання МВ та ОВ. Для вимірювання МВ та ОВ можуть бути використані різноманітні методи та засоби вимірювання витрат. Великою популярності через свої переваги здобули витратоміри Коріоліса (ВК). ВК мають високу точність та придатні для прямого вимірювання МВ із густиною та в’язкістю відмінною від води, тому їх використовують для вимірювання витрат таких рідин, як: нафтопродукти (НП), спирти, рідини харчової промисловості та ін. Однак, для виконання вимірювань із заданою точністю від виробника, необхідно під час монтажу виконувати умови передбачені виробником. До таких умов належить: встановлення положення витратоміру, довжина прямого трубопроводу перед та за витратоміром, виконання умов необхідного тиску у системи, виконання умов герметичності трубопроводу у системі та ін. Прецизійність конкретного ВК можна дізнатись за результатами перевірки метрологічних характеристик, що виконується в уповноважених лабораторіях на проведення вимірювань. Вимірювання проводяться у лабораторних умов із використанням систем перевірки при сталій швидкості потоку. Однак, визначена похибка вимірювання під час перевірки ВК в лабораторних умовах при статичних параметрах потоку води, не гарантує відповідності похибці вимірювання ВК у технологічному процесі, в умовах ДВ, тобто при зміні параметрів потоку НП під час вимірювання.

Для здійснення заданого наливу та вимірювання МВ 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 із зберіганням інформації на електронних носіях.

Однак, на підприємствах які використовують АСН у складі яких є ВК для комерційному обліку або у технологічному процесі, під час якого вимірюється МВ рідин, властивості яких відмінні від води, в умовах зміни параметрів потоку НП під час вимірювання, з'являється необхідність у досліджені тих параметрів, які можуть впливати на точність вимірювання ВК.

Мета і завдання

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності вимірювання масової витрати та густини нафтопродуктів витратоміром Коріоліса. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз існуючих методів та засобів вимірювання масової витрати рідини;

- провести аналіз відомих методів та засобів вимірювання масової витрати за принципом сили Коріоліса;

- обґрунтувати параметри потоку, зміна яких при вимірювані ВК впливає на точність вимірювання МВ та густини потоку рідини;

- оцінити вплив неінформативних параметрів потоку, зміна яких під час вимірювання ВК, збільшують похибку вимірювання ВК та становлять додаткову складову похибки вимірювання;

- провести аналіз відомих функцій перетворення ВК;

- вивести функцію перетворення, що однозначно пов'язує вихідну величину, а саме, МВ із вхідними величинами, а саме, площа поперченого перерізу, жорсткість і довжину ВТ, а також, зміна швидкості та густину потоку;

- оцінити похибку квантування ВК за вимірювальним каналом МВ;

- розробити математичну модель ВК у вигляді диференційного рівняння та оцінити динамічні метрологічні характеристики;

- виконати аналіз відомих методів обробки сингалів ВК;

- розробити схему функціональну мікропроцесорну ВК;

- виконати аналіз методів та засобів вимірювання тиску і вибрати для удосконалення інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) ВК у складі АСН;

- розробити експериментальну установку для дослідження впливу зміни параметрів потоку рідини на точність вимірювання ВК;

- визначити основні параметри нафтопродуктів (НП) для проведення експериментального дослідження;

- провести експериментальне дослідження впливу зміни параметрів потоку НП, а саме дизелю та бензину;

- провести експериментальне дослідження впливу зміни параметрів потоку нафтопродуктів, а саме дизелю та бензину із застосуванням удосконаленої ІВС ВК;

- порівняти розроблену ІВС з існуючими;

- визначити бюджет складових невизначеності результатів вимірювання, оцінити складові невизначеності результатів вимірювання, а також оцінити що обумовлені зміною швидкості потоку та характеру течії потоку рідини, МВ та густину якого вимірюються ВК;

- удосконалити методику повірки ВК у складі АСН;

- оцінити критерії зміни параметрів потоку рідини, що впливають на точність вимірювання ВК, які дозволять контролювати виконання вимірювань за заданих умов, що підвищить точність вимірювання ВК.

Об’єкт дослідження

Процес вимірювання масової витрати потоку рідини із змінною параметрів потоку під час вимірювання.

Предмет дослідження

Методи та засоби підвищення точності вимірювання масової витрати витратоміру Коріоліса рідини при зміні параметрів потоку нафтопродуктів.

Методи дослідження

В процесі виконання дисертаційної роботи проводяться дослідження із застосуванням основи теорії вимірювального перетворення неелектричних величин для розробки математичної моделі ВК, методи математичного, фізичного

та комп’ютерного моделювання з використанням середовища Maple при дослідженні застосування сили Коріоліса для ДВ МВ потоку рідини, основи теорії вимірювань похибок для оцінювання метрологічних характеристик використаного засобу, методи математичної статистики при обробці результатів вимірювань під час дослідження збіжності результатів вимірювання та оцінювані невизначеності результатів вимірювання, методів постановки та планування експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- удосконалено математичну модель засобу динамічних вимірювань, у вигляді диференційного рівняння, яка порівняно з відомими враховує зміну швидкості потоку;
- вперше розроблено та оцінено критерій допустимого значення зміни параметрів потоку рідини, відповідність числовому значенню якого забезпечує задану точність, а при перевищені цього числового значення, за допомогою регулюючих пристроїв забезпечується зміна параметрів потоку до нормованого значення, що дозволило підвищити точність вимірювання масової витрати в 3 рази для бензину та в 2 рази для дизельного палива;
- отримала подальший розвиток методика повірки витратоміру Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу нафтопродуктів, як на відміну від відомих враховує критерій індексу пульсації потоку нафтопродуктів, а саме, дизелю та бензину.

Особистий внесок здобувача

В роботах [15], [21], [63] проведено аналіз наукових робіт про основні метрологічні характеристики сучасних АСК на нафтобазах. Наведені вимоги до точності вимірювання МВ НП на нафтобазах. Обґрунтовано низку параметрів потоку, що впливають на точність вимірювання ВК у складі АСН на нафтобазах. Проведено експериментальне дослідження АСН на основі масового ВК за хаотичної змінної та незмінної швидкості вимірюваного потоку НП для оцінювання впливу на точність вимірювання ВК у складі цієї системи. Розроблено структурну схему експериментальної установки. Проведено обробку результатів

вимірювання. Запропоновано методи контролю параметрів вимірюваного потоку НП у трубопроводі на вході та на виході ВК.

В роботі [54], [56] проведений аналіз наукових робіт, присвячених оцінюванню невизначеності результатів ДВ та проведено розрахунок оцінюванню невизначеності результатів ДВ.

В роботі [57] проведений аналіз наукових робіт, присвячених методів оцінюванню рівня довіри для визначення коефіцієнтів охоплення та проведено розрахунок враховуючи основні метрологічні ризики.

В роботах [47], [55] за результатними аналізу науково-технічної літератури було обґрунтовано основні параметри потоку, які знижують точність вимірювання ВК та становлять додаткову невизначеність вимірювання. Сформовано бюджет невизначеності вимірювання і розраховані додаткові складові невизначеності результатів вимірювання та включені до бюджету складових невизначеності, які враховують фактори зміни швидкості потоку та характеру течії потоку рідини, МВ та густину якого вимірюються ВК. Досліджено наступні параметри: зміна швидкості потоку, зміна тиску у трубопроводі перед і за витратоміром та зміна температури. Оцінено критерій зміни параметрів потоку рідини. Запропоновано критерії контролю, що залежить від динамічних характеристик засобу вимірювання. Описано спосіб оцінювання складової невизначеності результатів вимірювання обумовленою зміною швидкості та тиску вимірювального потоку рідини. Запропоновано спосіб зміни параметрів потоку рідини до нормованих значень, що підвищить точність вимірювання масової витрати рідини, характеристики якої відмінні від води.

Усі наукові результати, що виконані у дисертаційному досліджені, отримані здобувачем особисто. У публікаціях, що опубліковано у співавторстві, використано виключно ті ідеї та положення, які є результатом особистих досліджень автора.

Апробація матеріалів дисертації

Отримані результати досліджень дисертаційної роботи обговорювались на: Четвертій міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» ВНТУ у 2017 році , на П’ятій міжнародній

наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» ВНТУ у 2019 році, на XV Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» у м. Вінниця в 2020 році, на L Науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ у 2021 році, на XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» КПІ у 2021 році, на X Всесвітньому конгресі „Авіація в XXI столітті" НАУ у 2022 році.

Публікації на тему дисертації

Основні результати дослідження опубліковано у 8 наукових працях. Із них 2 статті у закордонному виданні, що включене до науковометричної бази Scopus; 2 статті, що опубліковано у наукових журналах виданнях МОН України та 4 тез доповідей на Всеукраїнських та міжнародних конференціях (Додаток А).

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів та висновків до кожного з них, загальних висновків, списку літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 144 сторінок, основний зміст викладено на 115 сторінках. Робота містить 7 таблиць і 43 рисунки. Список використаних літературних джерел налічує 64 найменувань, кількість додатків – 3.

Практичне значення отриманих результатів

Результати досліджень можуть бути застосовані на підприємствах, які застосовують ВК у технологічному процесі у складі АСН для ДВ МВ та густини рідини. Повірочними та калібрувальними лабораторіями, які перевіряють метрологічні характеристики ВК за місцем експлуатації. А також, підприємствами які виконують роботи з розробки та монтажу систем вимірювання витрати у складі яких застосовуються ВК (Додаток В).

Результати дослідження дисертаційної роботи впроваджено на кафедрі інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету у навчальному процесі студентів спеціальності 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» під час викладання дисципліни «Вимірювальні перетворювачі» (Додаток В).

РОЗДІЛ 1
ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ РІДИН

1.1 Огляд відомих методів та засобів вимірювання об’ємної та масової витрати

Підвищення якості виробленої продукції та ефективності автоматизованих систем керування технологічними процесами робить надзвичайно важливим точне вимірювання кількості та витрат різних речовин. Вимірювальні засоби, які визначають масову та об’ємну витрату речовин, повинні відповідати високим вимогам щодо точності.

Різноманітність вимірювальних середовищ з різними фізико-хімічними властивостями, а також різні вимоги промисловості до метрологічних характеристик і надійності витратомірів, зумовили розробку засобів вимірювання витрати, які базуються на різних принципах і методах вимірювання [1].

Витрата речовини – це кількість переміщуваної речовини, що проходить за одиницю часу через трубопроводів із визначеним поперченим перерізом [2]. Витрату речовини виражають в об'ємних або масових одиницях вимірювання:

$$Q_V = V/t, \tag{1.1}$$

$$Q_m = m/t, \tag{1.2}$$

де t – одиниця часу, [с];

V – об’єм речовини, яка пройшла через трубопровід за одиницю часу, [м^3];

m - маса речовини, яка пройшла через трубопровід за одиницю часу, [кг].

Перехід від одиниць ОВ до одиниць МВ, обчислюється за формулою

$$Q_m = Q_V \cdot \rho, \tag{1.3}$$

де Q_m – МВ речовини, [кг/год];

Q_V – об'ємна витрата (ОВ) речовини, [м^3/год];

ρ – густина речовини, [кг/м^3].

Класифікація методів та засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ представлена в роботі [3]. Отже, за вимірюваною величиною

витратоміри поділяються на об'ємні та масові. Об'ємні витратоміри, залежно від фізичних явищ, на яких вони базуються, поділяються на механічні, механіки рідин і газів, електродинамічні та хвильові. Масові лічильники, у свою чергу, поділяються на теплові та механічні.

За принципом роботи до об'ємних механічних витратомірів належать тахометричні та осцилювальні витратоміри. До об’ємних витратомірів механіки рідин і газів належать манометричні та із тілом обтікання. До електродинамічних належать іонізаційні, електромагнітні та магнітні. До хвильових належать ультразвукові. До масових теплових належать калориметричні, термоконвективні та термоанемометричні, а до механічних – інерційні.

Далі представлено основні методи та засоби вимірювання витрати рідини, а саме масової та ОВ НП, які можна використовувати для цих цілей, а також наведено переваги та недоліки кожного з них.

1.1.1 Манометричні витратоміри

За ефектом, що лежить в основі роботи манометричні витратоміри розділяють на: відцентрові струменеві; гідравлічні опори (із кривизною потоку та капілярними або пористими перегородками); із використанням усередненої напірної трубки; звужувальні пристрої (діафрагми, сопла, труби Вентурі) [3]. Звужувальні пристрої, а саме, діафрагми, сопла, труби Вентурі гуртуються на методі змінного перепаду тиску. Метод змінного перепаду тиску, який має значне практичне значення, базується на зміні статичного тиску середовища при проходженні через штучно звужений перетин трубопроводу. Для вимірювання витрати речовини використовуються витратоміри із звужуючим пристроєм.

Принцип дії таких витратомірів полягає в зміні потенційної енергії вимірюваної речовини при проходженні через звужений перетин трубопроводу.

Витратомір складається з звужуючого пристрою, встановленого в трубопроводі для створення локального стиснення потоку, первинного перетворювача, диференціального манометра для вимірювання різниці статичних

тисків речовини у трубопроводі до і після звужуючого пристрою, вторинного перетворювача, та двох трубок, що з'єднують обидва прилади.

Звужуючий пристрій зазвичай має круглий отвір, розташований концентрично відносно стінок труби, діаметр якого менше внутрішнього діаметра трубопроводу.

Витратоміри із звужуючим пристроєм підходять для вимірювання речовини, що проходить через трубопровід, за умови повного заповнення поперечного перерізу труби і звужуючого пристрою цією речовиною.

Рівняння для масової і об'ємної витрат нестисливої рідини:

$$Q_V = \alpha \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)}, \tag{1.4}$$

$$Q_m = \alpha \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}, \tag{1.5}$$

де ρ – густина середовища, [кг/м^3];

d – діаметр отвору діафрагми, [м^3];

α – коефіцієнт діафрагми;

P_1 і P_2 – відповідно тиск потоку речовини перед діафрагмою і після неї, [Па].

Для вимірювання витрати речовини дістали поширення наступні звужуючі пристрої [3]: витратомірна діафрагма (рис.1.1.а), витратомірне сопло (рис.1.1 б) і труби Вентурі (рис.1.1 в), які мають посередині круглий отвір.

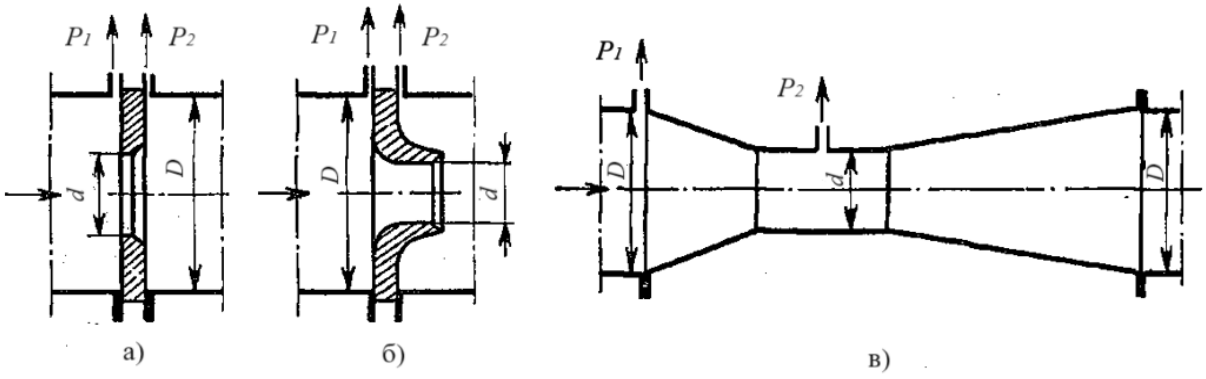


Рис. 1.1. Схеми стандартних звужуючих пристроїв: а) витратомірна діафрагма; б) витратомірне сопло; в) труби Вентурі.

Для цих звужуючих пристроїв розраховані значення коефіцієнта витрати α, що дозволяє застосовувати їх без виконання попереднього градуювання. На рис.1 показані місця вимірювання тисків P_1 і P_2 від звужуючих пристроїв до диференціального манометра. Особливістю звужуючих пристроїв (рис.1 б, в) є менша, ніж для діафрагми, без відновлення втрата тиску.

Похибка вимірювання масової та ОВ діафрагм і сопел становить ±0,6…2,5%.

Перевагами методу змінного перепаду тиску із застосуванням звужуючих пристроїв є: простота і надійність; відсутність рухомих частин; легкість серійного виготовлення для будь-яких тисків і температур вимірюваного середовища; низька вартість; можливість отримання градуйованої характеристики витратомірів розрахунковим шляхом.

Недоліками є: залежність від рівномірності та нерозривності потоку; проходження середовища через звужуючий пристрій призводить до значної втрати тиску, що може негативно вплинути на загальну ефективність системи; витратоміри із звужуючим пристроєм можуть мають обмежений діапазон вимірюваних витрат, що обмежує їх застосування в умовах змінних витрат; зміни в фізичних властивостях речовини, таких як, густина або в'язкість, впливає на точність вимірювань, що вимагає додаткових корекційних розрахунків, висока чутливість до умов експлуатації.

Значно впливають на точність вимірювання умови монтажу звужуючих пристроїв у трубопроводах. При недотриманні вимог до встановлення, похибка вимірювання значно зростає.

Перед і після звужуючого пристрою необхідно мати прямі заспокоювані ділянки трубопроводу постійного діаметра, оскільки наявність локальних опорів (колін, вентилів, засувок і т.п.) приводять до наявності нерівномірного потоку і, отже, впливають на коефіцієнт витрати α [4].

Ці недоліки можуть обмежувати використання методу змінного перепаду тиску у певних сферах, а саме вимірювання масової та об’ємної витрати НП та вимагає додаткових заходів для забезпечення точності та надійності вимірювань.

Витратоміри обтікання належать до великої групи витратомірів, які також називають витратомірами постійного перепаду тиску або ротаметрами. В цих витратомірах тіло, що підлягає обтіканню може бути: поплавець, поршень, поворотний клапан, пластинка, кулька, тощо піддається силовому впливу потоку, що збільшується зі зростанням витрати. Це переміщує тіло обтікання, в результаті чого сила, яка його переміщує, зменшується і знову врівноважується протидіючою силою. Протидіючою силою може бути вага тіла обтікання при русі потоку вертикально знизу вгору або сила пружини при довільному напрямку потоку. Вихідним сигналом таких витратомірів є переміщення тіла обтікання. На рис. 1.2 наведена схема перетворювального елементу витратоміру обтікання.

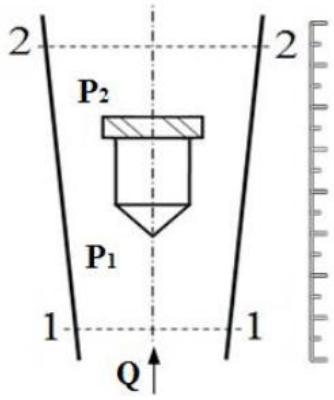


Рисунок 1.2 – Схеми витратомірів обтікання

Згідно зі схемою на рис. 1.2, у конічній трубці розміщений поплавець. При переміщені поплавця вгору під дією потоку збільшується площа поперечного перерізу прохідного кільця між поплавцем і стінкою конічної трубки, що призводить до зменшення сили, яка діє на поплавець, що створюється напором потоку. Речовина, протікаючи через прорізи, змушує поплавець обертатися, центруючи його в середині потоку. Коли сили врівноважуються, які діють на поплавець, вимірювальний елемент встановлюється на висоті, яка відповідає вимірюваному значенню витрати, за рахунок градування конусу вздовж можливого руху вимірювального елементу.

Поплавок буде нерухомо утримуватись в потоці речовини, якщо сили, що діють на поплавок зверху і знизу, будуть врівноважені:

$$p_1 - p_2 = (g - W - N)/f, \quad (1.4)$$

де p_1, p_2 – різниця статичних тисків перед та після поплавка, [Па];

g – сила тяжіння, що діє на поплавок, [м/с^2];

W– динамічний тиск потоку, [Па];

N – сила тертя потоку об поверхню поплавка, [Н];

f – площа максимального поперечного перерізу поплавка, [м^2].

Для вимірювання витрати потоку речовин у технологічних процесах застосовуються ротаметри, що забезпечені передавальними перетворювальними елементами з електричним або пневматичним вихідним сигналом.

Клас точності цих ротаметрів у комплекті із вторинним приладом – 2,5.

Розглянуті вище методи вимірювання витрати речовини характеризуються тим, що у вимірювальному середовищі перебуває чутливий елемент приладу і зазнає механічного та хімічного впливу, а також спричиняє втрату тиску потоку. Безперервна дія потоку речовини на чутливий елемент із часом, може вплинути на форму чутливого елементу, що безпосередньо вплине на точність, надійність і термін служби приладу [3].

Для вимірювання витрати хімічно агресивних, абразивних, НП та інших рідини, які пошкоджують матеріал дотичних до них частин витратоміра, не придатні, через короткий строк експлуатації.

1.1.2 Тахометричні витратоміри

За ефектом, що лежить в основі роботи тахометричні витратоміри розділяють на: камері (із рухливим роздільним елементом, із еластичними стінками та без роздільних елементів); шарикові (із циліндричною, конусною або тороїдальною доріжками); турбінні (із прямими або гвинтовими лопатями).

В основу камерних та турбінних витратомірів покладено швидкісний метод.

Принцип дії цих приладів полягає у вимірюванні середньої швидкості потоку, що характеризує об'ємну витрату речовини залежністю:

$$Q_m = v_{\text{ср}} \cdot S, \quad (1.6)$$

де $v_{ср}$ – середня швидкість потоку, [м/с];

S – поперечний переріз потоку, [м^2].

Камерні та турбінні витратоміри найчастіше застосовуються для вимірювання об’єму рідини, а саме, води, що проходить через трубопровід. Однак їх застосовують і для вимірювання ОВ НП. Чутливим елементом їх є лопатева вертушка, що обертається за рахунок руху потоку рідини. Також, вісь вертушки за допомогою передавального механізму, у вигляді редуктора, який зменшує частоту обертання, зв'язана з лічильником обертів приладу. Таким чином, залежність витрати рідини, що протікає через витратомір, визначається за формулою:

$$Q_V = \frac{n \cdot S}{C}, \tag{1.7}$$

де n – частота обертання лопатевої вертушки, [об/хв];

C – постійний коефіцієнт.

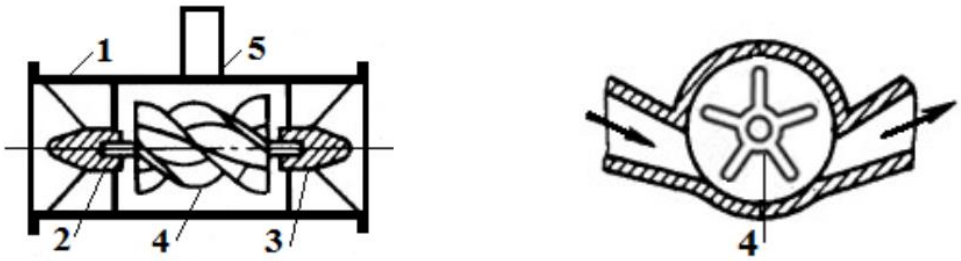
Формула (1.7) дійсна лише за умови відсутності завихрень рідини, викликаних місцевими опорами (вигинами трубопроводу, вентилями тощо) поблизу витратоміру.

Суттєвим недоліком камерних витратомірів є залежність їх показань від в'язкості вимірюваної рідини.

Камерні витратоміри призначені для встановлення в горизонтальних трубопроводах і застосовуються для вимірювання малих витрат води до 10 м³/год. Турбінні витратоміри можуть бути встановлені в будь-якому положенні і використовуються для вимірювання більших витрат води до 150 м³/год.

Усі тахометричні витратоміри енергонезалежні. Ці вимірювальні прилади є досить поширеними і мають клас точності в межах 0,2-0,5. Тахометричні витратоміри із крильчаткою або турбіною здебільшого виготовляються для труб діаметром від 4 до 750 мм.

Тахометричні прилади вимірюють об'ємні витрати в межах 0,03-1500 м³/год. Для вимірювання МВ вони повинні бути обладнані або вимірювачами температури і тиску та вимірювачами густини, а також, обчислювальними пристроями. Тахометричні витратоміри використовуються для вимірювання витрати рідини води, НП та інших рідин.



а) б)

Рисунок 1.3 – Схеми швидкісних витратомірів: а) з турбінкою; б) з крильчаткою. 1 – трубопровід; 2, 3 – елементи для стабілізації потоку; 4 – вертушка; 5 – пристрій формування вихідного сигналу

Корпус 1 перетворювача є відрізком труби з двома фланцями для підключення до трубопроводу. Всередині корпусу розташовані елементи для стабілізації потоку 2 і 3, з'єднані нерухомою віссю, на якій встановлена вертушка 4. На рисунку 1.3.а показана турбінка з лопатями, вигнутими по гвинтовій лінії, вісь обертання якої паралельна напрямку руху потоку речовини. На рисунку 1.3.б зображена крильчатка з прямими лопатями.

Частота обертання турбінки або крильчатки пропорційна ОВ вимірюваного середовища. Із використанням тахометричного перетворювача 5 ця частота перетворюється у вихідну частоту напруги, а далі перетворюється в аналоговий вихідний сигнал. У тахометричних витратомірах, вимірюючи кількість обертів турбінки або крильчатки за допомогою лічильного механізму 5, визначається ОВ речовини [5].

Перевагами тахометричних витратомірів є: енергонезалежність; простота конструкції; забезпечують точність вимірювань у межах класу точності 0,2-0,5; широкий діапазон застосувань; міцність і надійність.

Недоліками тахометричних витратомірів є: залежність точності вимірювання від в'язкості рідини; вплив місцевих опорів; неточність при малих витратах; вимоги до прямих ділянок трубопроводу; для вимірювання масових

витрат необхідно використовувати додаткові вимірювачі температури, тиску або густини, а також обчислювальні пристрої.

1.1.3 Електромагнітні витратоміри

До приладів для вимірювання витрати рідини, чутливий елемент яких не має контакту із середовищем потоку, що дозволяє застосовувати їх для вимірювання ОВ агресивних речовин відносять електромагнітні витратоміри.

Електромагнітні витратоміри використовуються для вимірювання ОВ електропровідних рідин. Використовуються для вимірювання ОВ води, різних розчинів, таких як, солей і кислот, а також розплавлених металів та інших електропровідних речовин, значення електричної провідність яких становить не менше значення електропровідності води. Принцип дії полягаю у наступному. Під час проходженні в трубопроводі потоку електропровідної рідини поперек силових ліній магнітного поля в ній з'являється електрорушійна сила, величина якої визначається за формулою:

$$E = B \cdot l \cdot v_{\text{ср}} = \frac{4 \cdot B \cdot Q_V}{\pi \cdot d}, \tag{1.8}$$

де B – магнітна індукція, [Тл];

l – відстань між кінцями електродів у трубі з внутрішнім діаметром d, [м].

Електромагнітний витратомір являє собою гідродинамічний генератор змінного струму, дія якого викликає появу електрорушійної сили, пропорційної середній швидкості потоку, а отже, і витраті рідини.

Схема електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем зображена на рис.1.4.

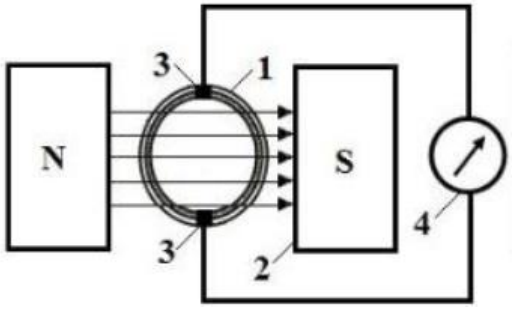


Рис. 1.4. Схема електромагнітного витратоміра: 1 – корпус, 2- магніт, 3-електроди, 4 – вимірювальний пристрій

Корпус 1 – це труба, виконана з немагнітного матеріалу і покрита зсередини електричною ізоляцією, наприклад, емаллю, емаллю, фторопластом, що розміщена між полюсами магніту 2. Також, магнітні силові лінії, що створює магніт, спрямовані перпендикулярно до вектору швидкості руху рідини. Через стінку труби ізольовано від самої труби введені електроди 3, які знаходяться у безпосередньому контакті з рідиною. Отримана інформація надходить до вимірювального пристрою 4 [6].

Електромагнітні витратоміри мають вбудований у вимірювальний блок на базі мікропроцесору, що отримує та обробляє вимірювальну інформацію від датчика витрати, який встановлено на трубопроводі, також має можливість передачі даних на персональний комп’ютер через інтерфейс зв’язку, що дозволяє реєструвати значення миттєвої ОВ [7].

Вимірювання ОВ речовини електромагнітним методом може здійснюватися із використанням як постійного магніту, так і магніту зі змінним магнітним полем. Електромагнітні витратоміри мають низу переваг та недоліків.

Перевагами електромагнітних витратомірів є: можливість застосування в трубах різного діаметру; відсутність впливу в'язкості і густини вимірювального середовища на точність вимірювання ОВ; відсутність спричинення вимірювальним елементом втрат тиску в трубопроводі; висока швидкодія.

Основними недоліками електромагнітних витратомірів є: непридатність для вимірювання витрат газу і пари; непридатні для вимірювання ОВ рідин діелектриків, НП, спирти та ін.

1.1.4 Ультразвукові витратоміри

На сьогодні відома низка ультразвукових витратомірів газу або рідини, що застосовуються для вимірювання витрат речовин із широким спектром діаметрів трубопроводів, також мають різні виконання із вбудованими датчиками та із зовнішніми датчики. Серед найпоширеніших можна виділити методи, засновані на переміщенні акустичних коливань рухомого середовища, а саме: за часом, перехресно-кореляційний, ехо-імпульсний. А також методи, що ґрунтуються на

ефекті Доплера [8]. За ефектами, що лежать в основі роботи та особливостями конструкцій поділяють на: частотні, фазові, часово-імпульсні. А також, поділяють на однопроменеві та багатопроменеві.

Ультразвуковий метод вимірювання часу проходження рухомої середовища, (рис.1.5) ґрунтується на визначенні часу проходження ультразвукової хвилі між двома датчиками розташованими під кутом до трубопроводу, попутного t_{AB} та протилежного t_{BA} напрямків руху. Знаючи часові затримки поширення звукової хвилі t_{AB} та t_{BA}, середню швидкість потоку υ можна визначити за формулою:

$$\upsilon = \frac{L^2}{2M}\left(\frac{\Delta t}{t_{AB} \cdot t_{BA}}\right), \tag{1.9}$$

$$\Delta t = t_{BA} - t_{AB}, \tag{1.10}$$

де Δt – різниця часу, [с]

L – довжина шляху ультразвукової хвилі, [м];

M – зміщення по осі ультразвукової хвилі вздовж труби, [м].

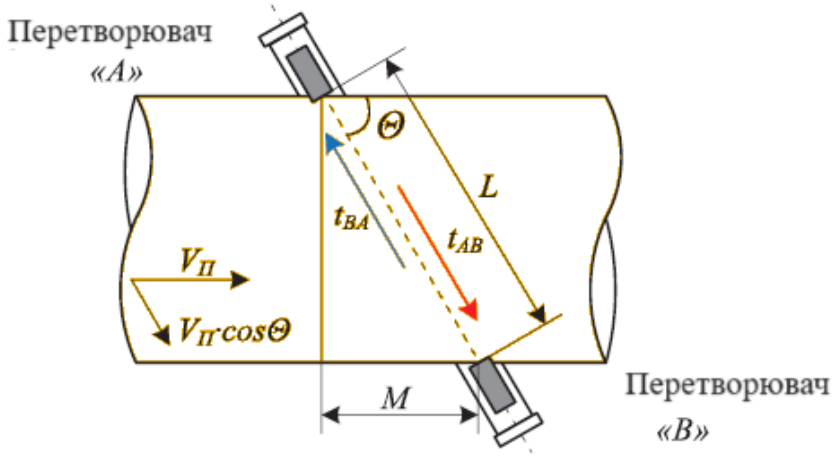


Рис 1.5. Метод вимірювання різниці часу проходження ультразвукової хвилі.

Даний метод вимірювання отримав найбільше поширення в ультразвукових витратомірах, які вимірюють однорідні потоки. Для отримання інформації про кількість бульбашок газу в рідині у вимірюваному об'ємі застосовують модифікацію методу часу проходження: аналізують коефіцієнт згасання ультразвукової хвилі в середовищі, який пропорційний об'ємному вмісту включень

від 4% до 6%. При великій кількості бульбашок газу в рідині або пари в газі використовується метод вимірювання доплерівського зсуву [9].

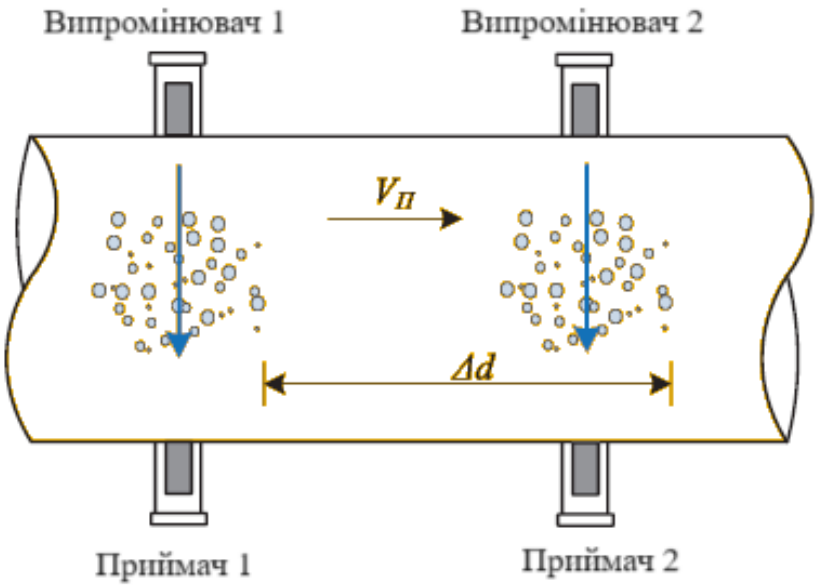


Рис 1.6 Ультразвуковий кореляційний метод вимірювання швидкості потоку

Ультразвуковий кореляційний метод вимірювання швидкості потоку базується на визначенні часу проходження групи "розсіювачів" ультразвукової хвилі між двома точками вимірювання при досягненні максимального значення функції взаємної кореляції в виміряних відліках (рис. 1.6). У момент часу $t = t_1$ випромінюється ультразвуковий пучок, потім високочастотне відлуння цього сигналу E_1 піддається аналого-цифровому перетворенню та реєструється. Група розсіювачів довжиною N точок проходить відстань r до другої точки вимірювання. Другий ультразвуковий пучок випромінюється в момент часу $t = t_2$, до цього часу група розсіювачів зсувається на невідому відстань Δd. УЗ також зсувається на нову позицію в цифровому записі цього сигналу E_2. Відстань (виражена через час), на яку зсунулися розсіювачі, може бути визначена через кореляцію початкового відлуння-відгуку в E_1 з різними ділянками відгуку E_2 рівної довжини. Часова діаграма представлена на рис. 3.6.

Математично, цей процес полягає у зсуві часового вікна відгуку E_1 на величину s, а потім в зміні цієї величини до виявлення співпадіння відгуку в E_2.

Коефіцієнт кореляції *R(s)* обчислюється для кожного значення *s*, і значення аргументу, при якому досягається максимум *R(s)*, відповідає моменту часу $s = \tau$ - новому положенню розсіювачів.

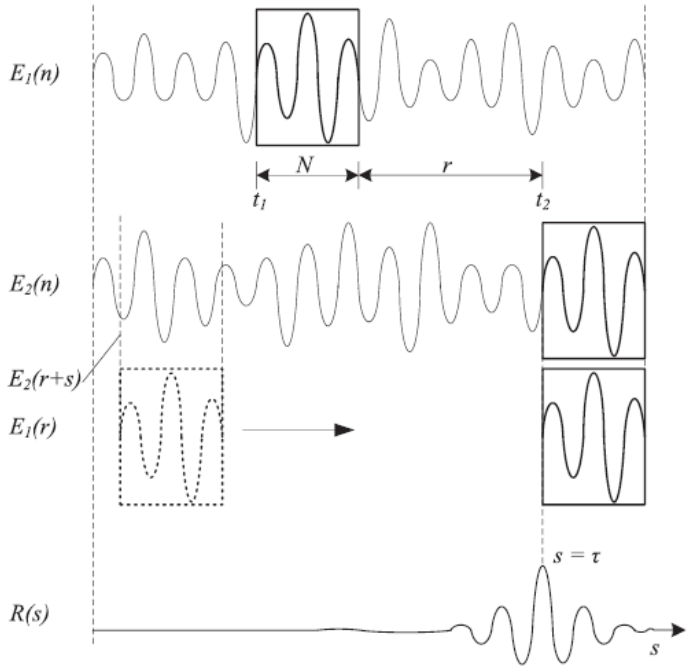


Рис 1.7 Часова діаграма

Після визначення величини τ, відстань, на яку зсунулися розсіювачі вздовж напрямку поширення пучка, виражається як:

$$d_a = \frac{c \cdot \tau}{2}, \tag{1.11}$$

де *c* - швидкість звуку, [м/с].

Ультразвукові витратоміри є найперспективнішими для комерційного обліку завдяки кільком перевагам: відсутність рухомих частин і елементів, що виступають у потік; не створюють додаткових втрат напору; можуть тривалий час працювати від вбудованого автономного джерела живлення; клас точність становить 0,2.

Недоліками є: збільшення похибки вимірювання при мінімальній швидкості потоку; складність і висока вартість пристроїв; вплив на точність вимірювання наявності двофазного потоку; необхідність значних довжин прямих ділянок трубопроводу до і після витратоміру.

1.1.5. Теплові витратоміри

За принципом дії, теплові витратоміри поділяють на: калориметричні, термоконвективні та термоанемометричні. За ефектами, що лежать в основі роботи та особливостями конструкції термоконвективні поділяють на: парціальні; із тепловим зондом; із зовнішнім нагрівом; симетричним положенням термоперетворювача; асиметричним положенням термоперетворювача; із нагрівачем, суміщеним з термоперетворювачем. А калориметричні поділяють на: із постійною температурою підігріву потоку або із постійною потужністю нагрівача. Термоанемометричні бувають плівкові або дротикові [3].

Принцип їхньої роботи полягає у вимірюванні ефекту теплового впливу на потік речовини, яке контактує з потоком, що залежить від витрати. Вони використовуються для вимірювання витрати газу, а рідше – для вимірювання витрати рідини.

Термоанемометричний метод базується на залежності між швидкістю потоку і тепловіддачею чутливого елемента, розміщеного в потоці та нагрітого за рахунок проходження через чутливий елемент електричного струму. Термоанемометри, вирізняються малою інерційністю, високою чутливістю, точністю, надійністю та компактністю. Їх застосовують для вимірювання швидкості потоку речовин від 0,1 м/с [6].

Вторинним вимірювальний перетворювачем (ВВП) термоанемометра є вимірювальний міст опору, одним із резисторів є терморезистор у вигляді нитки з вольфраму, нікелю, срібла, ніхрому, або платини довжиною від 3 до 12 мм і діаметром від 0,005 до 0,15 мм. Нитка нагрівається вище температури середовища, швидкість потоку якого необхідно вимірювати, що зафіксована на тонких електропровідних стрижнях, які виготовлені з манганіну. Кількість тепла, що передається нагрітою ниткою і залежить від фізико-хімічних властивостей потоку речовини. Зміна температури, що перетворюється в опір первинного вимірювального перетворювача (ПВП), далі перетворюється ВВП у вигляді мостової схеми. На рис. 1.8 представлена схема термоанемометричного методу вимірювання швидкості потоку [6].

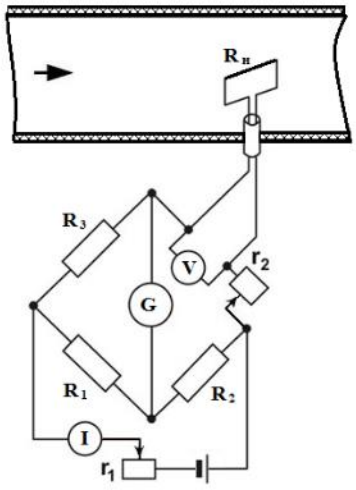


Рис. 1.8. Схема термоанемометричного витратоміру

Принцип дії калориметричних витратомірів ґрунтується на нагріванні потоку речовини, що проходить через визначених розмірів трубопровід і вимірюванні різниці температур до і після нагрівача.

Схема калориметричного витратоміра представлена на рис.1.9. У трубопроводі 1 розміщений нагрівальний елемент 3, що нагріває потік, на рівних відстанях від центра нагрівача розташовані термоперетворювачі 2 і 4, які перетворюють температуру потоку до нагрівання t_1 і після нагрівання - t_2.

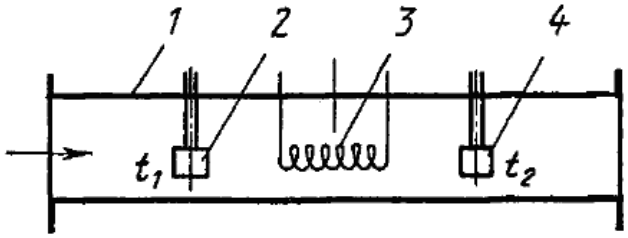


Рис. 1.9 Схема калориметричного витратоміра: 1 – трубопровід; 2,4 – термоперетворювачі; 3 – нагрівач потоку

Перевагами теплових витратомірів є: клас точності 0,5 – 1,0; широкий діапазон вимірювання; висока швидкодія; незалежність від густини та в’язкості потоку; компактність.

Недоліками теплових витратомірів є: залежність від температури навколишнього середовища; забруднення чутливих елементів, що впливає на точність і стабільність роботи; обмежена стійкість до агресивних середовищ.

1.1.6 Інерційні витратоміри

Інерційні витратоміри за ефектами, що лежать в основі роботи та особливістю конструкцій поділяють на: Коріолісові, турбосилові, гігроскопічні [3].

Коріолісові витратоміри відносяться до категорії інерційних вимірювальних пристроїв, що працюють на основі первинних вимірювальних перетворювачів. У цих перетворювачах потік рідини, витрата якої вимірюється, надається додатковий рух - коливальний, обертальний або обидва одночасно. У результаті такого додаткового руху конструктивні елементи перетворювача деформуються під впливом сил інерції. Кожна з цих сил, згідно з другим законом Ньютона, пропорційна масі рідини та прискоренню її руху. У витратомірах, які працюють на принципі коріолісового ефекту, внаслідок силової дії виникає коріолісове прискорення, яке залежить від МВ потоку [10].

Сила Коріоліса - сила інерції, що існує в системі відліку, що обертається і діє при русі в напрямі під кутом осі обертання. Прискорення Коріоліса - це частина загального прискорення тіла, що виникає при його русі в обертальній системі відліку [10].

Суть використання ефекту Коріоліса в ПВП МВ полягає в тому, що вимірювальна (витратомірна) *U*-подібної форми трубка коливається відносно осі 0-0' з миттєвою кутовою швидкістю ω, перпендикулярно до місця з'єднання трубки (рис. 1.10). Сила Коріоліса діє на тіло масою, яке рухається з постійною лінійною швидкістю і одночасно обертається з кутовою швидкістю та направлена перпендикулярно до напрямку руху [11]. При проходження речовини через U-подібну трубку із певною швидкістю та масовою витратою**,** поступальний рух рідини розділяється на дві фази: рух речовини від основного трубопроводу до середини згину, що відповідає вхідній частині вимірювальної трубки (ВТ) та зворотний рух до трубопроводу, що відповідає вихідній частині ВТ, водночас цей

рух здійснюється при одночасному синусоїдальному коливанні трубки. Це спричиняє виникнення коріолісового прискорення, що призводить до появи сили Коріоліса.

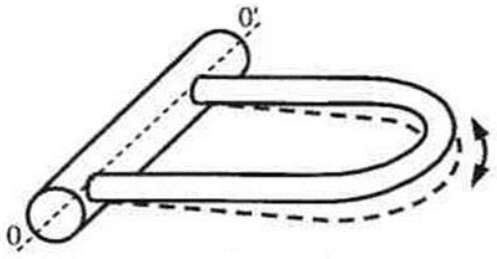


Рис. 1.10. Ефект сили Коріоліса в U-подібній трубці

Витратоміри Коріоліса мають кілька переваг перед усіма іншими розглянутими вище витратомірами, що робить витратоміри Коріоліса найбільш відповідними для вимірювання МВ НП. Основними перевагами витратомірів Коріоліса є: клас точності за каналом вимірювання МВ становить 0,2; збіжність результатів вимірювання 0,05%; здійснюється пряме вимірювання МВ, що є ключовою перевагою, оскільки відпуск НП здійснюється за масою НП; здійснюється пряме вимірювання густини потоку; мінімальні втрати тиску у трубопроводі і відповідно МВ під час вимірювання ВК; можливість вимірювати масову витрату, як у прямому ,так і в зворотному русі потоку.

Недоліками є: великі габарити та вага; чутливість до вібрації; збільшення похибки вимірювання МВ та густини при наявності двофазного потоку.

Гіроскопічними називають витратоміри, в яких виникає гіроскопічний момент під впливом зовнішнього силового впливу, що залежить від витрати. ПВП витратоміру складається з ділянки труби у вигляді кільцевої петлі або подібної форми, що обертається з постійною кутовою швидкістю навколо осі [6].

Гіроскопічні витратоміри використовують принцип дії гіроскопа для вимірювання витрати рідини або газу. Вони засновані на вимірюванні коріолісових сил, що виникають при переміщенні рідини або газу в обертовій системі.

Основні елементами ПВП є: ротор, який обертається з постійною швидкістю; вимірювальна камера через яку протікають речовина; чутливий елемент який

перетворює гіроскопічні сили, що виникають внаслідок обертання та руху потоку у зміну положення чутливого елементу та датчики положення які перетворюють зміну положення у значення МВ.

Перевагами гіроскопічних витратомірів є: клас точності 0,5; пряме вимірювання МВ; широкий діапазон вимірювання

Недоліками гіроскопічних витратомірів є: висока вартість, складність конструкції, що призводить до регулярного технічного обслуговування, чутливість до зовнішніх вібрацій, необхідність створення стабільного обертання.

Турбосиловими називають силові витратоміри, в ПВП яких в результаті силового впливу, потік закручується, що пропорційно масовій витраті [6].

Турбосилові витратоміри використовуються для вимірювання витрати рідини або газу. Вони засновані на принципі перетворення кінетичної енергії потоку в обертальний рух турбіни, де швидкість обертання турбіни пропорційна швидкості потоку рідини або газу.

Основні елементами турбосилового витратоміра: корпус в якому міститься внутрішні компоненти і забезпечується захист витратоміра. В корпусі встановлено турбіну, підшипники, тахометричні датчики та електронний блок, що обробляє інформацію.

Перевагами турбосилових витратомірів є: клас точності 0,5; пряме вимірювання МВ; широкий діапазон вимірювання

Недоліками турбосилових витратомірів є: висока вартість, складність конструкції, що призводить до регулярного технічного обслуговування, відсутність каналу вимірювання густини потоку.

1.2 Огляд відомих методів та засобів вимірювання масової витрати та густини рідини із використанням ефекту Коріоліса

1.2.1 Витратоміри Коріоліса

Існую різні методи із конструктивними особливостями витратомірів Коріоліса. Суть цих методів полягає в тому, що коли речовина протікає через вимірювальну трубку, що коливається, виникає сила Коріоліса, яка викликає

додаткові коливання трубки. Ці коливання пропорційні МВ. Конструктивно ВК має або прямі або U-подібні трубки з паралельними коливаннями.

Із використання прямих трубок, метод полягає у використані двох прямих трубок, які коливаються паралельно одна одній. Рідина або газ проходить через ці трубки, викликаючи силу Коріоліса, яка змушує трубки деформуватися. Датчики, встановлені на трубках, вимірюють фазовий зсув між коливаннями вхідної і вихідної частин трубки, що дозволяє визначити масову витрату. А із використанням U-подібної трубки, може використовуватись одна або декілька U-подібних трубок, які також коливаються паралельно. Фазовий зсув між коливаннями різних частин трубки вимірюється і використовується для розрахунку МВ.

Існує метод із антипаралельними коливаннями трубок. У цьому методі використовуються дві трубки, які коливаються у протилежних напрямках. Вимірюється зсув фаз між коливаннями трубок, викликані проходженням рідини або газу. А також, використовується конструкція із одною трубкою через яку проходить вимірюване середовище. Датчики вимірюють фазовий зсув між коливаннями різних частин трубки для визначення МВ. Хоча цей метод менш поширений, він все одно застосовується в деяких випадках.

Розглянемо будову та принцип дії на прикладі конструктивної реалізації ВК із двома U-подібними трубками.

Принцип дії витратоміра Коріоліса описаний в роботі [11] і базується на використанні сенсора, що складається з вимірювальних сенсорних трубок (поз. 1, рис. 1.11) [6], розташованих паралельно одна одній. Між цими трубками розташована задавальна котушка (поз. 3, рис. 1.11), що викликає коливання трубок. Оптичні сенсори (поз. 2, рис. 1.11), розміщені на виході та вході речовини, визначають положення трубок відносно одна одної. Під дією потоку рідини чи газу трубки починають коливатися у зворотному напрямку залежно від величини витрати. Ці коливання викликають коріолісове прискорення, яке змінює положення трубок. Зміна положення трубок визначається детекторами і перетворюється в електричні сигнали. Електронний перетворювач конвертує ці сигнали у стандартні

вихідні сигнали та у цифровий формат, що дозволяє отримати дані про витрату речовини через вимірювальний пристрій із виміряною температурою вимірюваного середовища отриманої термоперетворювачем (поз. 4, рис. 1.11).

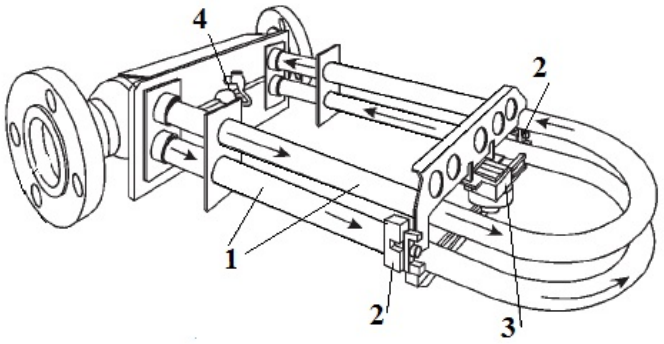


Рис. 1.11 Схема витратоміра Коріоліса: 1 – вимірювальні трубки; 2– оптичні сенсори; 3 – задавальна котушка;4 – термоперетворювача

МВ потоку речовини, яка вимірюється, поділяється на дві рівні половини, що протікають через кожну вимірювальну трубку. ВТ приводяться до коливального руху котушками, внаслідок чого вони починають коливатися вгору і вниз у протилежних напрямках одна відносно одної.

На вимірювальних трубках встановлені два , лівий і правий, що складаються з магнітів і котушок-соленоїдів (поз. 2, рис. 1.11). Котушки розташовані на одній вимірювальній трубці, а магніти - на іншій. Кожна котушка взаємодіє із однорідним магнітним полем постійного магніту. Згенерована напруга від кожної котушки має форму синусоїдальної хвилі (рис. 1.12а). Порівняння цих сигналів, через зсув фаз, виявляє рух однієї трубки відносно іншої.

Таким чином, речовинам, що протікають, надається вертикальна складова руху ВТ. Коли сенсорна трубка рухається вгору під час першої половини циклу коливання, рідина, що входить у трубку, чинить опір руху трубки, тиснучи на неї вниз. Поглинувши цей вертикальний імпульс при русі навколо вигину трубки, потік речовини, що виходить з трубки, під час зворотного руху чинить опір, що супроводжується зменшенням вертикальної складової руху, штовхаючи трубку вгору, що призводить до деформації ВТ – її закручування.

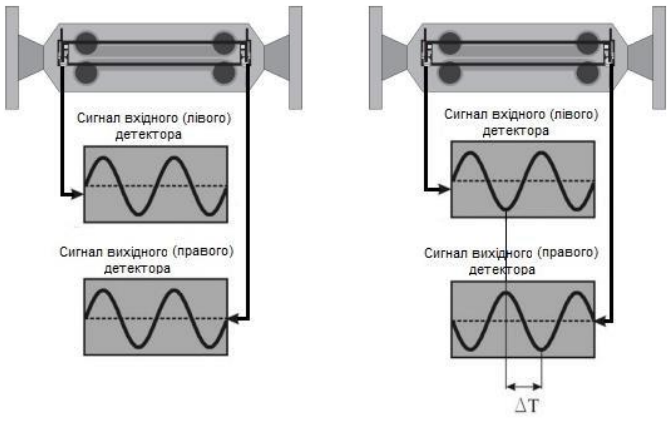
У другій фазі вібраційного циклу, коли трубка рухається вниз, напрям вигину змінюється на протилежний, і трубка закручується в іншу сторону. Такі

закручування сенсорних трубок ілюструють ефект Коріоліса, в результаті чого трубка здійснює крутильні коливання. Детектори, розташовані на вхідній та вихідній частинах ВТ, вимірюють зсув по фазі при русі протилежних сторін ВТ.

У випадку коли витрата у трубках відсутня, синусоїдальні сигнали, що надходять з оптичних сенсорів, зсув фаз яких наближається до нуля (рис. 1.12а) [6].

І відповідно коли потік речовини у трубках відсутній, вони не деформуються. При наявності витрати синусоїдальні сигнали, що надходять з детекторів, за фазою відмінні від нуля, і чим більша витрата, тим більше фазовий зсув (рис. 1.12б), оскільки сигнал від вхідного боку трубок запізнюється відносно сигналу з вихідного боку за рахунок деформації ВТ. Зсув фаз перетворюється у різницю в часі ΔT між сигналами та вимірюється в мікросекундах і прямо пропорційна МВ. Чим більше МВ, тим більше ΔT.

Частота коливань сенсорних трубок залежить від їхньої геометрії, матеріалу, конструкції та маси. Маса вимірювального елемента складається з двох частин: маси ВТ і маси вимірюваного потоку речовини всередині трубок. Для певного діаметру трубопроводу маса ВТ є постійною.



а) *б)*

Рис. 1.12 – Сигнали, що надходять з детектора: а – за відсутності витрати; б – за наявності витрати.

Оскільки маса вимірюваного середовища дорівнює добутку густини середовища і внутрішнього об’єму трубок, а об’єм трубок також є постійним для

конкретного типорозміру, частота їх коливань може бути прив’язана до густини середовища і визначена шляхом вимірювання періоду коливань. Також, оскільки густина рідини залежить від її температури, зміни, викликані коливаннями температури рідини, що проходить через витратомір, враховуються за допомогою додаткового термоперетворювача (поз. 4, рис. 1.2), наприклад, платинового термометра опору, розміщеного в сенсорі витратоміра.

Пропорційні витратам сигнали від ПВП, виміряне значення температури та частота збудження власних механічних коливань витратомірних трубок надходять до ВПВ сигналів. Сигнали з ВПВ обробляються для формування стандартних вихідних сигналів витрати, температури та густини продукту. Одним із рішень перетворення переміщення ВТ є зчитування за допомогою оптичних перетворювачів, сигнал на виході яких буде імпульсом, що пропорційний витраті [12].

1.2.2 Методи та засоби вимірювання кута зсуву фаз

Фазовий зсув вимірюють за допомогою методів безпосередньої оцінки, порівняння та опосередкованих методів. Класифікація цих методів виконана у підручнику [13]. Вибір методу вимірювання залежить від рівня, форми та частоти сигналу, необхідної точності вимірювання та особливостей досліджуваного об'єкта.

Фаза відтворює стан гармонічного сигналу в конкретний момент часу. Для синусоїдного сигналу:

$$u(t) = U_m sin(\omega t + \varphi), \tag{1.12}$$

де $(\omega t+\varphi)$ – фаза, що є лінійною функцією часу,

φ – початкова фаза сигналу.

Фазовий зсув є модулем різниці початкових фаз двох сигналів однакової частоти, наприклад $u(t)$ та $i(t)$ мають однакову частоту:

$$u_1(t) = U_{m1} sin(\omega t + \varphi_1), \tag{1.13}$$

$$u_2(t) = U_{m2} sin(\omega t + \varphi_2). \tag{1.14}$$

Тоді:

$$\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|. \quad (1.15)$$

де φ – зсув фаз, [рад].

Прямий метод вимірювання кута зсуву фаз або метод безпосередньої оцінки реалізують за допомогою спеціальних приладів, а саме, фазометрів, до яких належать: аналогові електромеханічні однофазні та трифазних фазометри; аналогові електроні фазометри; цифрові фазометри. Фазометри мають вихідну величину для градуйована у кутових градусах або в радіанах.

Аналогові електромеханічні фазометри, побудовані на основі логометричних механізмів електродинамічної та електромагнітної систем, застосовують для вимірювання кута зсуву фаз між струмом та напругою однофазних та трифазних споживачів у частотному діапазоні від 0,02 до 10 КГц при високих рівнях сигналу, значення напруги яких менше 600 В і невисокій точності вимірювання, класи точності яких становлять 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Недоліком цих приладів є високе власне споживання потужності [13].

Електронні аналогові та цифрові фазометри застосовують для вимірювання кута зсуву фаз між двома гармонічними сигналами (напругами та струмами) у діапазоні частот від 1 Гц до 10 МГц при низьких рівнях сигналів і високій точності вимірювань, класи точності становлять 0,1; 0,2.

За допомогою електронного осцилографа реалізують метод порівняння і використовують для вимірювання кута зсуву фаз між двома сигналами однакової частоти у широкому діапазоні частот, який визначається смугою пропускання осцилографа від 10 Гц до 20 МГц.

Залежно від методу перетворення зсуву фаз в певну фізичну величину, принцип дії електронних фазометрів лежить в основі наступних методів: перетворення зсуву фаз в частотний інтервал; методом дискретної лічби та за допомогою осцилографа [7].

Розглянемо електронний фазометр часового перетворення. Принцип дії часового перетворення полягає в перетворенні у часовий інтервал двох синусоїдальних значень напруги, що формується у моменти переходу цих двох значень напруги через рівні нуля з похідними однакового знаку [7].

Структурна схема електронного фазометру часового перетворення представлена на рис. 1.13.

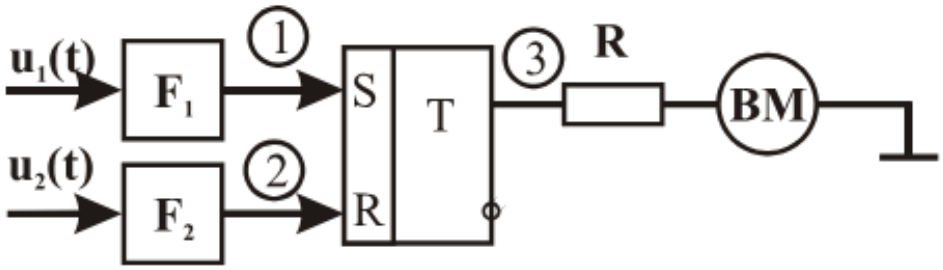


Рис. 1.13. Структурна схема електронного фазометру часового перетворення

Значення напруги $u_1(t)$ та $u_2(t)$, між якими необхідно виміряти зсув фаз φ, поступають на входи формувачів F_1 та F_2. В момент проходження синусоїдальних значень напруги $u_1(t)$ та $u_2(t)$ через значення нуль, на виходах формувачів F_1 та F_2 формуються короткі прямокутні імпульси, які надходять на входи тригера S та R. За допомогою SR-тригера T в кожному періоді T_x синусоїдальних значень напруги $u_1(t)$ та $u_2(t)$ формується часовий інтервал τ_x, пропорційний зсуву фаз φ.

Отримана послідовність імпульсів τ_x, подається на магнітоелектричний вимірювальний перетворювач ВМ і на виході отримуємо пропорційне зсуву фаз φ середнє значення струму. Отримаємо рівняння:

$$I_{cp} = \frac{I_m}{2\pi} \cdot \varphi, \tag{1.16}$$

де I_{cp} – середнє значення струму, [А];

I_m – струм, максимальне значення якого задається за допомогою струмообмежувача резистора R, [А].

Порівняно з електромеханічними фазометрами, суттєвою перевагою електронних є інваріантність показів до частоти.

Розглянемо принцип дії цифрових фазометрів. Принцип дії полягає у перетворені зсуву фаз двох періодичних сигналів у часовий інтервал однакової частоти із наступним його квантуванням імпульсами зразкової частоти.

Структурна схема цифрового фазометра миттєвих значень представлена на рис. 1.14.

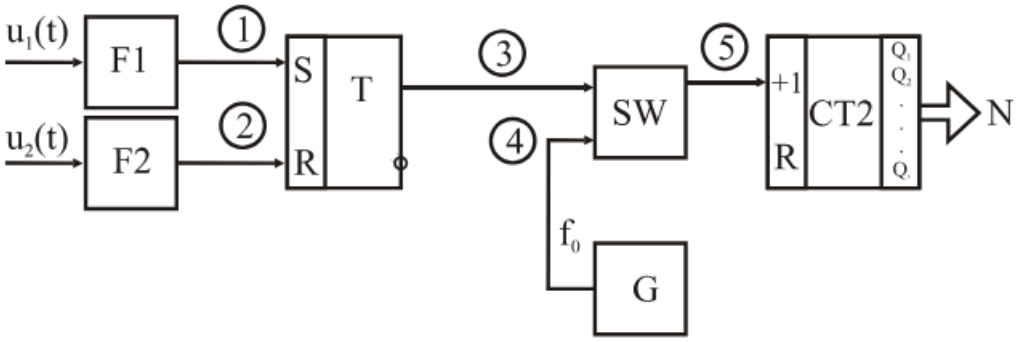


Рис.1.14. Структурна схема цифрового фазометра миттєвих значень

Значення напруги $u_1(t)$ та $u_2(t)$, зсув фаз φ, між якими необхідно виміряти, поступають на входи формувачів F_1 та F_2. В момент проходження синусоїдальних значень напруги $u_1(t)$ та $u_2(t)$ через значення нуль, на виходах формувачів F_1 та F_2 формуються короткі прямокутні імпульси, які надходять на входи тригера S та R. За допомогою SR-тригера T в кожному періоді T_x синусоїдальних значень напруги $u_1(t)$ та $u_2(t)$ формується часовий інтервал τ_x, пропорційний зсуву фаз φ. Квантування часового інтервалу τ_x імпульсами зразкової частоти f_0 із генератора G здійснюється за допомогою схеми збігу SW, що далі надходить на лічильник $CT2$, де відбувається підрахунок імпульсів T_0.

Часова діаграма представлена на рис. 1.15.

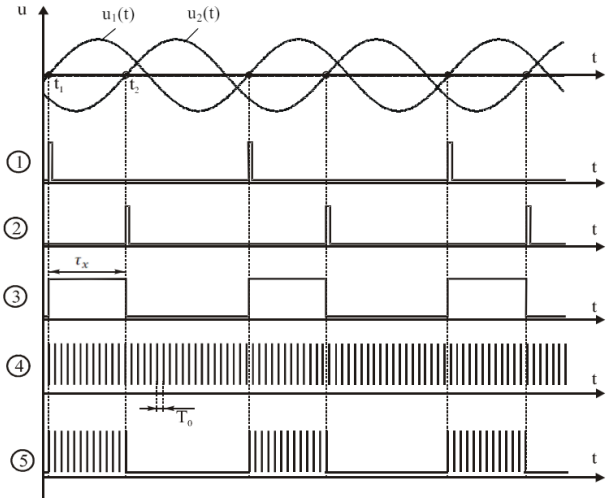


Рис.1.15 – Часова діаграма роботи цифрового фазометра миттєвих значень

Рівняння перетворення цифрового фазометра миттєвих значень має вигляд:

$$N = \tau_x \cdot f_0 = \frac{1}{2\pi}\frac{f_0}{f_x}\varphi, \qquad (1.17)$$

де N – кількість імпульсів;

τ_x – часовий інтервал, [с];

f_0 – зразкова частота генератора G, [Гц];

f_x – виміряна частота, [Гц].

Розглянемо принцип дії мікропроцесорного фазометру. Принцип дії мікропроцесорного фазометру заснований на перетворенні зсув фаз двох електричних періодичних сигналів однакової частоти у часовий інтервал з його наступним квантуванням імпульсами зразкової частоти [7].

Основними елементами мікропроцесорного фазометра є блоки узгодження сигналів значень напруги $u_1(t)$ та $u_2(t)$, мікроконтролер MCU, кварцовий резонатор частотою f_0 і пристрій індикації.

Структурна схема мікропроцесорного фазометру представлена на рис. 1.16.

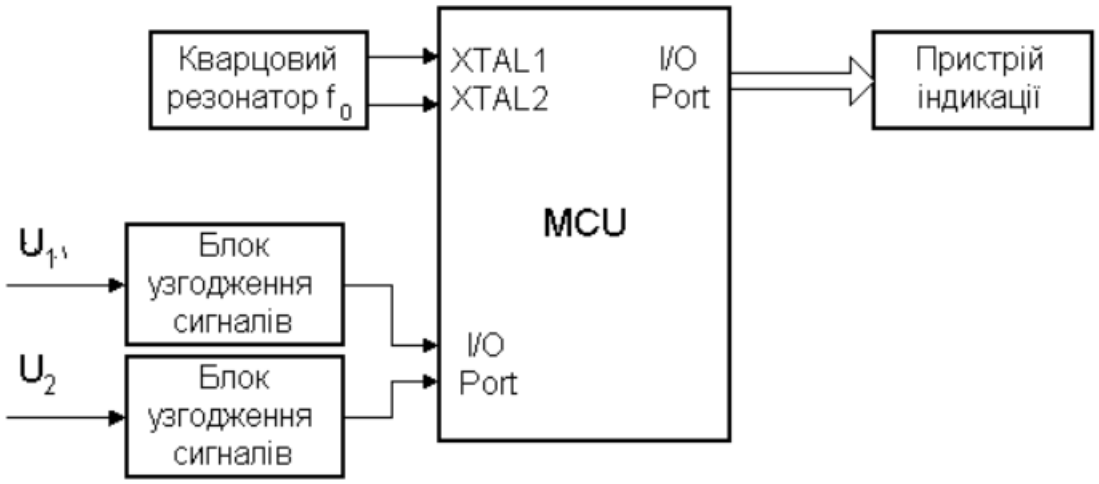


Рис. 1.16. Структурна схема мікропроцесорного фазометру

У момент переходу значення напруги U_1 через значення нуля запускається таймер на підрахунок імпульсів. Процедура лічби продовжується доки не появиться передній фронт імпульсу напруги U_2, який формується в момент досягнення значення напруги U_2 значення рівне нулю. Після цього робота таймера зупиняється і фіксується значення кількості імпульсів N, які усереднені в проміжках часу.

Для реалізації фазометру миттєвих значень необхідно реалізувати із таймерів два лічильники. Перший виконуватиме функцію підрахунку імпульсів зразкової частоти за інтервал часу, що дорівнює фазовому зсуву, в другий таймер виконуватиме вимірювання частоти, тобто буде підраховувати кількість імпульсів зразкової частоти протягом періоду, що відповідатиме зсуву фаз.

В такому випадку зсув фаз буде дорівнювати:

$$\varphi = \frac{N_\varphi}{N_f} \cdot 2\pi, \tag{1.18}$$

де N_φ – кількість імпульсів зразкової частоти за інтервал часу фазового зсуву;

N_f - кількість імпульсів зразкової частоти від переднього фронту напруги U_1 до переднього фронту напруги U_2.

Такий варіант апаратно-програмної реалізації фазометра має переваги перед усіма іншими розглянутими вище, через високу швидкодію та незалежності від частоти вхідних значень напруги.

1.3 Параметри потоку, що впливають на точність вимірювання масової витрати та густини потоку витратоміру Коріоліса

В роботі [14] розглянуто принципи та умови вибору, установки і застосування ВК для вимірювання МВ речовин у закритих трубопроводах. Також представлено неінформативні параметри, що впливають на точність вимірювання МВ ВК [15], а саме:

- діапазон вимірювання МВ;

- характеристики потоку: усталений, односпрямований або реверсивний, неусталений або пульсуючий;

- діапазон вимірювання густини, температури;

- тиск на вході та виході (достатній, щоб запобігти кавітації й розрідженню);

- властивості вимірюваних рідин, включаючи тиск насиченої пари, фазність потоку й агресивність.

В роботі [16] наведені результати досліджень, що для визначення дійсних метрологічних характеристик ВК який використовується для вимірювання НП,

можна використовувати воду, що значно спростить процедуру калібрування. Однак, при певних умовах навколишнього середовища, монтажу ВК у АСН та особливостей середовища вимірювального потоку, а саме НП, можуть впливати фактори, що описані вище, на точність вимірювання ВК. Підтвердженням цього є велика кількість досліджень та випробувань науковця в сфері обробки сигналів інформаційно-вимірювальних каналів ВК та проведення багаторазових випробувань із різними параметрами потоку, таких як наявність двофазного потоку (газ/рідина), трифазного потоку(газ/нафта/вода), при зміні в'язкості рідини та швидкості потоку.

В роботі [17] досліджувалось вплив наявності двофазного потоку (газ/рідина) та вплив зміни швидкості потоку. Експериментально отримано дані, що свідчать про збільшення похибки вимірювання МВ та густини потоку витратоміром Коріоліса при збільшені насиченості потоку газом. Зміна швидкості потоку також впливає на точність вимірювання ВК. Результати дослідження представлені у вигляді графіків на рис. 1.17.

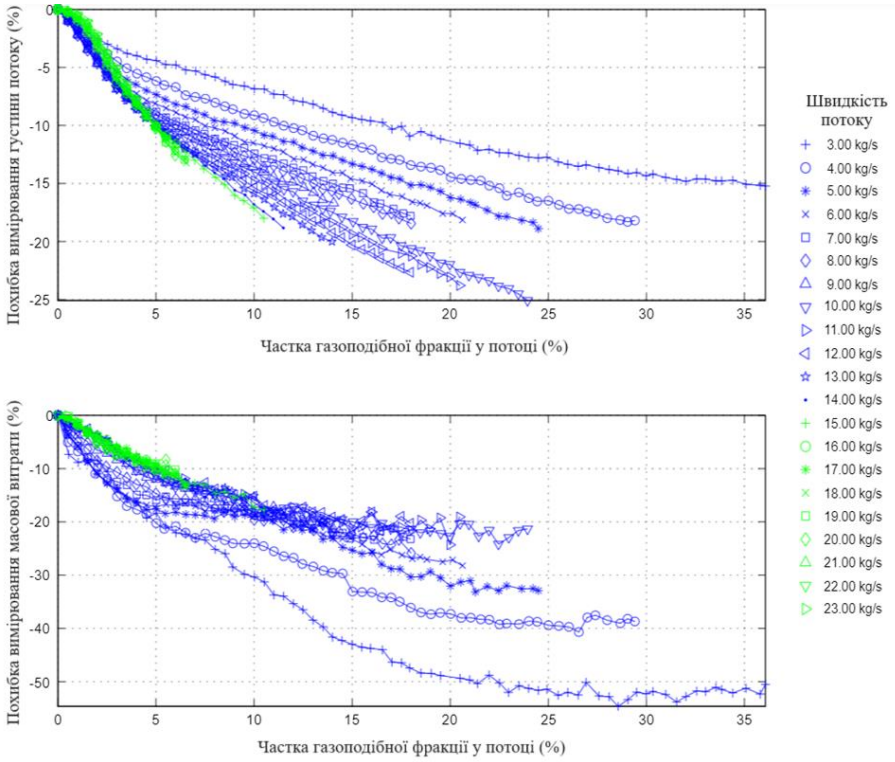


Рис 1.17. Залежність похибки вимірювання МВ та густини потоку ВК із діаметром 75 мм у вертикальному центруванні від наявності двофазного потоку (рідина - вода, газ – повітря).

З графіку видно, що навіть при наявності 5% частки газоподібної фракції у потоці рідини, похибка вимірювання густини в залежності від швидкості потоку може досягати 10%, а похибка вимірювання МВ до 20%, при дійсній похибці вимірювання МВ рідини витратоміру, що становить менше 0,2%.

В статті [17] досліджується вплив багатофазних потоків на точність роботи ВК. Виявлено, що вимірювачі показують високу точність при однофазних потоках, але при багатофазних потоках можуть виникати помилки через рух центру мас. Досліджено "теорію бульбашок", яка пояснює ці помилки через фазове роз’єднання рідини. В роботі представлено методологію коригування двофазних потоків для сумішей газ/рідина, ілюстровано прикладом високов'язкої нафти. Дано приклади похибок МВ рідини і газу та розглянуто методи їх коригування. Показано, що зміни геометрії сенсорних трубок можуть впливати на точність вимірювань, і надано методику розробки емпіричних моделей для покращення точності вимірювань. Геометричні розміри сенсорної трубки ВК можуть значно впливати на його ефективність та точність вимірювання. Зазвичай, збільшення довжини трубки може збільшити чутливість вимірювання, але водночас збільшує масу трубки, що може вплинути на її динамічну відповідь. Однак, незважаючи на досягнуті результати, вказано на потребу подальших досліджень для отримання глибшого розуміння роботи ВК при двофазних потоках.

В роботі [18] розглянута та досліджена проблема точного вимірювання рівня потоку змішаних масляно-газово-водяних сумішей у трубопроводах, яка залишається однією з ключових викликів у нафтовій промисловості. У цій статті описані методи вимірювання та основні базові технології, які в даний час використовуються комерційними виробниками. Для проведення дослідження була розроблена експериментальна установка, що представлена на рис. 1.18.

За результатами експерименту похибка вимірювання МВ ВК, як і в роботі [17] при сталій масовій витраті 6,3кг/с становить близько 20%, із вмістом газоподібної фракції у 30% (див. рис.1.19).

Однак, в залежності від насичення суміші водою від 0% до 100% зміна похибки становить близько 5%.

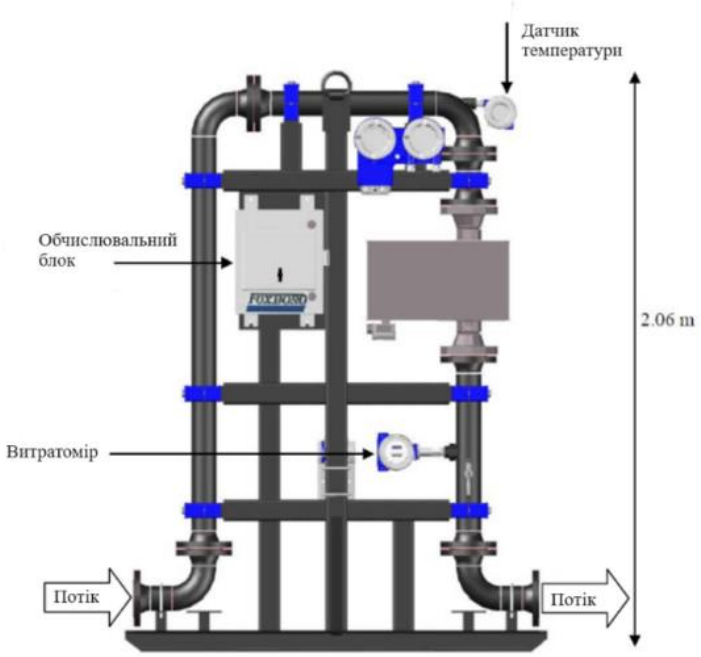


Рис. 1.18. Експериментальна установка для вимірювання масляно-газово-водяних сумішей

Можна зробити висновок, що при вимірювані сумішей масляно-газово-водяних та для двофазних сумішей нафта/вода, ВК, вимірювання, також не відповідають необхідній точності.

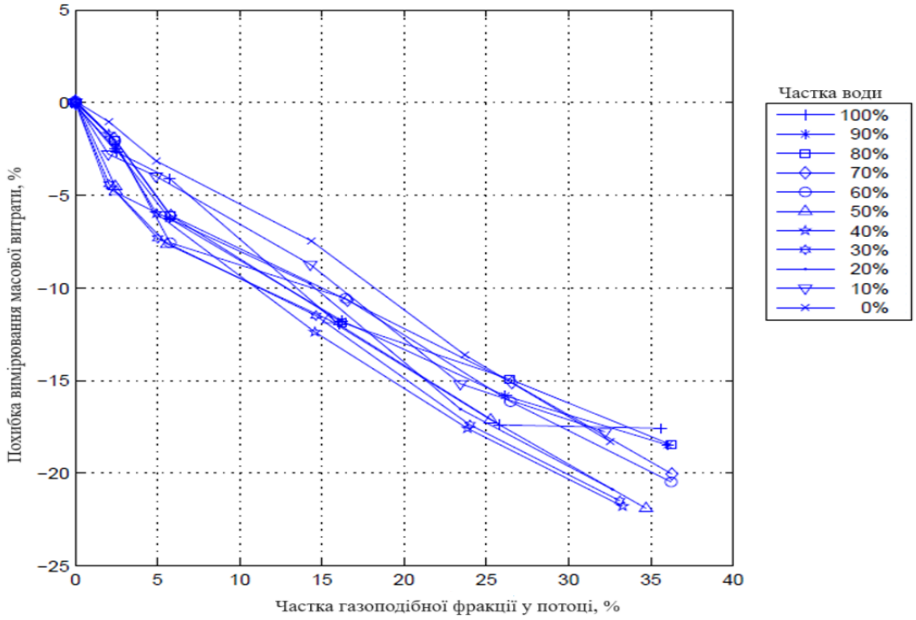


Рис. 1.19. Залежність похибки вимірювання МВ потоку змішаної масляно-газово-водяних суміші із визначеною складовою води від частки газоподібної фракції при визначеній витраті 6,3 кг/с

Зміна швидкості потоку в вимірювальних трубках ВК призводить до зміни тиску, а також впливає на режим течії потоку. Режими течії потоку розрізняють як: ламінарний, турбулентний та перехідний.[19]

Ламінарна течія - це вид течії рідини, при якому рідина рухається у впорядкованих шарах без змішування частинок і без коливань швидкості та тиску. В цьому типі течії лінії потоку визначаються формою русла, по якому рухається рідина, і у прямій трубі постійного перетину лінії потоку спрямовані паралельно осі труби. Ламінарна течія характеризується організованим рухом рідини, і при сталому тискі вона залишається постійною.

Турбулентна течія - це тип течії рідини, при якому спостерігається несталість руху, супроводжувана інтенсивним перемішуванням частинок рідини і коливаннями швидкості та тиску. Форма русла лише наближено визначає лінії потоку. Під час турбулентної течії частинки рідини виконують складний рух: вони переміщуються поступально, перемішуються між різними шарами та здійснюють обертальний рух навколо свого центру маси.

Перехідна течія - це течія, що відбувається між ламінарною та турбулентною течіями. Під час перехідної течії спостерігається змішаний характер руху рідини, коли деякі області можуть мати ознаки ламінарної течії, а інші - турбулентної. Цей процес може бути обумовлений зміною швидкості або інших параметрів середовища.

Зміна режиму течії визначається через співвідношенні між швидкістю, діаметром і в'язкістю рідини.

Зі співвідношення цих величин і було отримано безрозмірне число, що визначає режим течії рідини і названо іменем англійського вченого Рейнольдса, числом *Re*:

$$R_e = \frac{V \cdot d}{\nu}, \tag{1.19}$$

де V – швидкість потоку, [м/с];

d – діаметр труби, [м];

ν – кінетична в’язкість рідини, [м^2/с].

Виразимо число Рейнольдса через масову витрату рідини:

$$R_e = \frac{2Q_m}{\pi dvp}, \quad (1.20)$$

де Q_m – масова витрата [кг/с];

d – внутрішній діаметр ВТ ВК [м];

v – кінетична в'язкість [м^2/с];

ρ – густина [кг/м^3].

Таким чином, число Рейнольдса дозволяє визначити режим течії рідини в трубопроводі. Режим руху рідини впливає на гідравлічний опір трубопроводів. При вирішенні практичних завдань, пов'язаних з рухом рідини спочатку необхідно визначити режим течії рідини.

Для заданої геометрії області течії і заданих властивостей речовини існує певний діапазон чисел *Re*: $0 < Re \leq 2300$, у якому реалізується ламінарний режим течії; якщо діапазон значень числа *Re*: $2300 < Re \leq 4000$ характерною є зміна ламінарного і турбулентного режимів, тобто перехідний, а в діапазоні $4000 < Re$ завжди реалізується турбулентний режим [20].

При відомому режиму течії, можна визначити перепад тиску від час проходження потоку через ВТ у ВК. В технічній документації на витратоміри Endress&Hauser Promass 83F, запропоновано наступні формули для розрахунку перепаду тиску.

Для числа Рейнольдса менше на $Re < 2300$, використовується:

$$\Delta P = K_1 v Q_m + \frac{K_2 v^{0,25} Q_m^2}{\rho}, \quad (1.21)$$

де K_1 та K_2 – коефіцієнти, які залежать від діаметру ВТ ВК

Для числа Рейнольдса менше на $Re > 2300$, використовується:

$$\Delta P = K v^{0,25} Q_m^{1,85} p^{-0,86}, \quad (1.22)$$

де K– коефіцієнт, який залежать від діаметру ВТ ВК

В роботі [21] були виконанні розрахунки числа Рейнольдса для визначення режиму течії, МВ якої вимірювалась із застосуванням експериментальної установки.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

За результатами аналізу літературних джерел присвячених відомих методів та засобів вимірювання об’ємної та МВ було визначено переваги та недоліки кожного методів та відповідно засобів вимірювання, а саме: манометричних, тахометричних, електромагнітних, ультразвукових, теплових та інерційних витратомірів. Інерційні витратоміри, в яких використовується ефект Коріоліса для прямого вимірювання МВ, а також, який має канал вимірювання густини найбільш відповідає вимогам, що вимірювання МВ та густини НП. Клас точності ВК 0,1; 0,2.

Проведено аналіз відомих конструкцій ВК, наведено переваги кожного з них та вибрано для подальшого аналізу ВК із двома паралельними U-подібної форми вимірювальними трубками. Виконано опис будови ВК, представлено принцип дії та основних фізичних процесів, що відбуваються при вимірювань МВ та густини середовища, що протікає через ВТ у ВК.

Проведено аналіз відомих методів та засоби вимірювання кута зсуву фаз. Визначено переваги та недоліки кожного з них та вибрано мікропроцесорний фазометр миттєвих значень.

Також, проведений аналіз науково-технічної літератури, присвячених опису неінформативних параметрів, що впливають на точність вимірювання МВ та густини середовища, що протікає через ВТ витратоміру. Було визначено низку неінформативних параметрів, які можуть впливати на точність вимірювання та відокремлені ті, що впливають суттєво, тобто ті, що призводять до збільшення похибки вимірювання МВ та густини більше ніж на 0,2%. Серед таких є: наявність двофазності потоку (рідина/газ), недостатність тиску на вході та виході ВК, а також наявність пульсуючого потоку, що спричиняє зміну швидкості потоку та впливає на точність вимірювання різниці фаз амплітуд коливання ВТ ВК.

За результатами аналізу досліджень впливу двофазністі потоку із необхідною точністю, не може бути виміряна прямим методом, тільки через розділення на окремі фази, використовуючи для вимірювання МВ потоку окремий ВК для кожної фази. Також, запропоновані методи корекції у представлених для аналізу досліджень зменшую похибку вимірювання МВ у 25% до 5%, однак, це велика

похибка порівно із похибкою при вимірювані МВ однофазного потоку ВК, клас точності якого становить 0,2. Тому виникає потреба у контролі наявності двофазності потоку під час вимірювання ВК.

Про вплив пульсуючого потоку на точність вимірювання ВК, не вдалось знайти досліджень на цю тему, тому є актуальним дослідити та розрахувати межі допустимої зміни швидкості потоку при якій похибка вимірювання МВ та густини рідини не виходила б за меші класу точності.

РОЗДІЛ 2
ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТУ ВИМІРЮВАННЯ

2.1 Математичне моделювання витратоміру Коріоліса

В роботі [22] описано залежність МВ від сили Коріоліса, що виникає під час проходження потоку через сенсорні трубки витратоміра Коріоліса:

$$M_k = 2F_k d = 2\rho SLV\omega d, \tag{2.1}$$

де M_k - момент коріолісових сил, [Н ·м];

F_k - сила Коріолісова, [Н];

d - відстань між сенсорними трубками, [м];

ρ - густина рідини, [кг/м^3];

S - площа поперечного перерізу сенсорної трубки, [м^2];

L - довжина сенсорної трубки, [м];

ω – частота вимушених коливань, [рад/с];

V – швидкість потоку, [м/с].

А з урахуванням того, що МВ $Q_m=\rho SV$, вираз (2.1) набуде вигляду:

$$M_k = 2Q_m V\omega d, \tag{2.2}$$

Під дією моменту M_k U-подібна трубка повертається на кут γ і урівноважується моментом M_t сил пружності трубки, які діють у напрямі, протилежному коріолісовим силам:

$$M_t = K_t\gamma, \tag{2.3}$$

де K_t - модуль пружності трубки, [Н/м^2];

γ – кут повороту трубки, [рад].

У стані рівноваги матимемо:

$$2Q_m V\omega d = K_t\gamma. \tag{2.4}$$

Звідки:

$$Q_m = k\gamma, \tag{2.5}$$

де k – сталий коефіцієнт, $k = K_t/2LV\omega d$.

В роботі [23] наведено ілюстрацію опису процесу деформації вібраційного коріолісового перетворювача МВ рід дією сил Коріоліса, що зображена на рис. 2.1.

Вібраційний перетворювач МВ являє собою U-подібну трубку, жорстко закріплену в основі вільними кінцями вхідної та вихідної ділянок у вигляді консолі. Трубка має коливальний рух з частотою ω навколо осі, що проходить поблизу жорсткого закладення вільних кінців. При коливаннях консольна частина трубки переміщується у вертикальному напрямку зі швидкістю v. При русі в трубці потоку на консольні ділянки трубки діють знакозмінні сили Коріоліса, спрямовані в протилежні сторони.

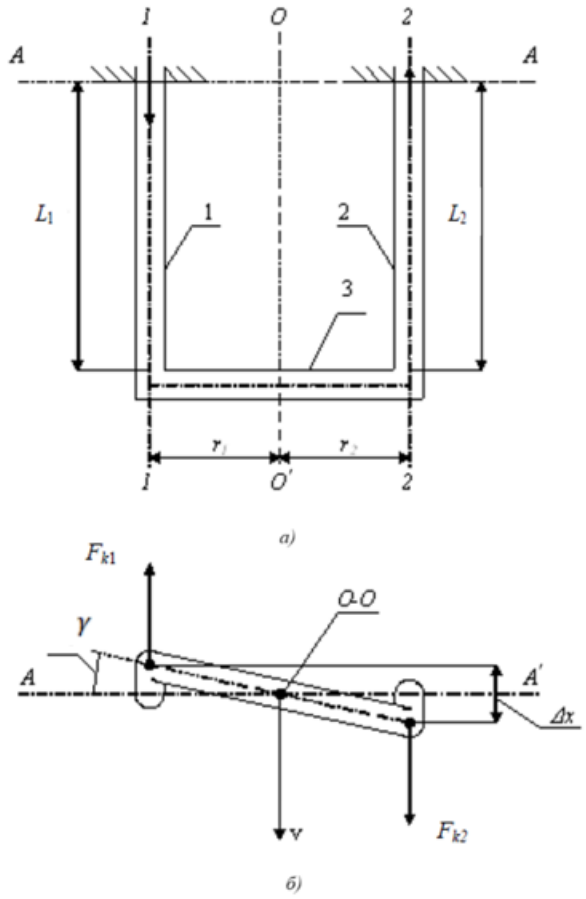


Рис. 2.1 - Деформація вібраційного коріолісового перетворювача масової витрати під дією сил Коріоліса: а) горизонтальна площина; б) фронтальна площина

А також, в роботі [23] представлено рівняння перетворення ВК, яке має вигляд:

$$Q_m = \Delta x \frac{kr+\frac{c}{r}+\frac{c_3}{L}}{r\omega A_k}, \quad (2.6)$$

де *Δx* – відносне зміщення во вертикалі ділянок *1* та *2 (рис. 1.4а)*;

k – жорсткість ділянок *1* та *2* трубки на проміжку вигину, [Н/м];

r – відстань ділянок на проміжку вигину, [м];

c – жорсткість ділянок *1, 2* при скручуванні, [Н/м];

c_3 - жорсткість ділянки *3* при скручуванні, [Н/м];

L – відстань трубки від входу до вигину, [м];

ω – частота вимушених коливань, [рад/с];

A_k – амплітуда вимушених коливань, [м].

На ділянку *1* U-подібної трубки на відстані L_1 від осі *A-A'* діє сила Коріолісу F_{k1}, спрямована проти руху трубки, а на ділянку *2* на відстані L_2 від осі *A-A'* діє сила Коріоліса F_{k2}, спрямована рухом трубки. Дія сил Коріоліса F_{k1} і F_{k2} викликає відносне зміщення по вертикалі ділянок *1* і *2*, яке можна розглядати як кут закручування γ навколо осі *O-O'*.

Звідки, спрощуємо вираз (2.6):

$$Q_m = \frac{k\Delta x r + \frac{c\Delta x}{r} + \frac{c_3 \Delta x}{L}}{2r\omega A_L} = \Delta x \frac{kr + \frac{c}{r} + \frac{c_3}{L}}{2r\omega A_L}. \quad (2.7)$$

Перехід від рівняння перетворення (2.7) до рівняння перетворення МВ в інтервалі часу Δt між однаковими фазами коливання ділянок *1* та *2*. Для цього виразимо зміщення Δx, як вираз моментального значення кутової швидкості ділянок *1* та *2* на відстані L від осі *A-A'* в фазі коливань ωt на інтервал часу Δt:

$$\Delta x = \Delta t \omega A_L |\cos n\pi| = \Delta t \omega A_L. \quad (2.8)$$

Підставивши (2.8) в (2.7), отримаємо рівняння перетворення МВ в інтервалі часу Δt із коефіцієнтом перетворення, що виражає жорсткість трубки при дії на неї сил Коріоліса, отримаємо:

$$Q_m = \Delta t \omega A_L \frac{kr + \frac{c}{r} + \frac{c_3}{L}}{2r\omega A_L} = \frac{\Delta t}{2}\left(k + \frac{c}{r^2} + \frac{c_3}{rL}\right). \quad (2.9)$$

У роботі [24], запропоновано математичну модель коливання трубки з потоком речовини, і показано, що МВ визначається за різницею фаз коливань двох точок, розташованих симетрично відносно точки докладання вимушеної сили. Отже, залежність має вигляд:

$$Q_m = \frac{c \cdot \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_k^2}\right)}{2L^2} \Delta t, \quad (2.10)$$

де C — жорсткість трубки [Н/м];

ω_p — частота вимушених коливань трубки за відсутньої швидкості потоку, [рад/с];

ω_k — частота вимушених коливань під дією Коріолісових сил рід час руху потоку по трубці, [рад/с];

L — довжина трубки, [м];

Δt — затримка часу між коливаннями двох точок трубки, [с].

2.2 Функція перетворення масової витрати та густини витратоміру Коріоліса

Виконавши аналіз відомих рівнянь перетворення ВК та методи математичного моделювання [25] запропоновано наступне, рівняння перетворення:

$$Q_m = K \cdot \Delta t \cdot \left(1 - \left(\frac{f_p(20℃)}{f_k(20℃)}\right)^2\right), \quad (2.11)$$

де K – сталий коефіцієнт витратоміру;

Δt — затримка в часі, між коливаннями двох точок трубки, що характеризується зсувом фази коливань сенсорної трубки, [Гц];

$f_p(20°C)$ — частота вимушених коливань трубки за відсутньої швидкості потоку при температури 20°*C,* [Гц];

$f_k(20°C)$ — частота вимушених коливань під дією Коріолісових сил під час руху потоку по трубці при температури 20°*C,* [рад/с].

Сталий коефіцієнт витратоміру знаходиться за формулою:

$$K = \frac{C}{2L^2}, \quad (2.12)$$

де C — жорсткість трубки [Н/м];

L — довжина трубки, [м].

Графік залежності МВ від зсуву фаз, що виражене через затримку в часі, представлений на рис. 2.2

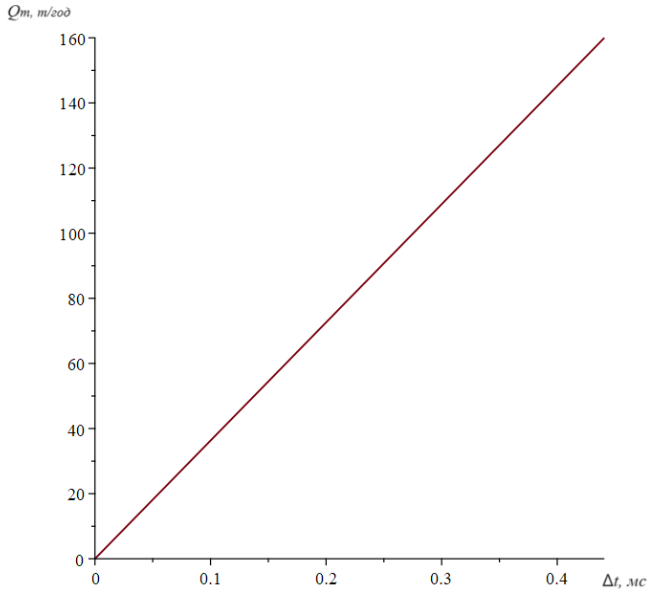


Рис.2.2. Графік залежності масової витрати від затримки в часі

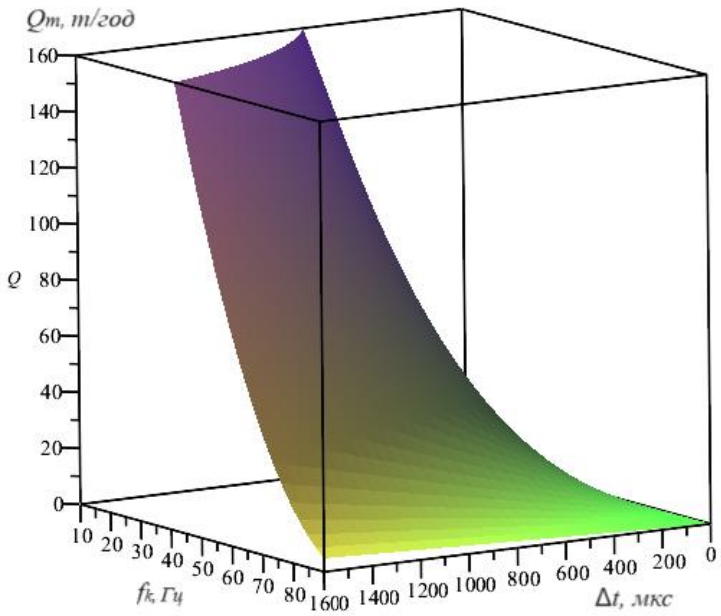


Рис.2.3. Графік залежності масової витрати від затримки в часі та частоти вимушених коливань під дією Коріолісових сил під час руху потоку по трубці

Також, необхідно привести значення частоти вимушених коливань під дією Коріолісових сил під час руху потоку по трубці до температури 20°*C*, що залежить від матеріалу, з якого виготовлені трубки та геометричних розмірів трубки при зміни температури під час вимірювання.

$$f_p(20℃) = f_p\left(1 + K_f(T - 20)\right), \tag{2.12}$$

де f_p– частота вимушених коливань під дією Коріолісових сил під час руху потоку по трубці, [Гц];

K_f– коефіцієнт поправки на температуру;

T – температура трубки, [°C].

Рівняння перетворення для вимірювання густини має наступний вигляд:

$$\rho = K\left(1 - \left(\frac{f_p(20℃)}{f_k(20℃)}\right)^2\right), \tag{2.13}$$

де ρ - виміряна густина, [кг/м^3]

$f_p(20°C)$ — частота вимушених коливань трубки за відсутньої швидкості потоку при температури 20°*C,* [Гц];

$f_k(20°C)$ — частота вимушених коливань під дією Коріолісових сил під час руху потоку по трубці при температури 20°*C,* [Гц].

Графік залежності густини від частоти вимушених коливань під дією Коріолісових сил під час руху потоку по трубці, представлений на рис.2.4.

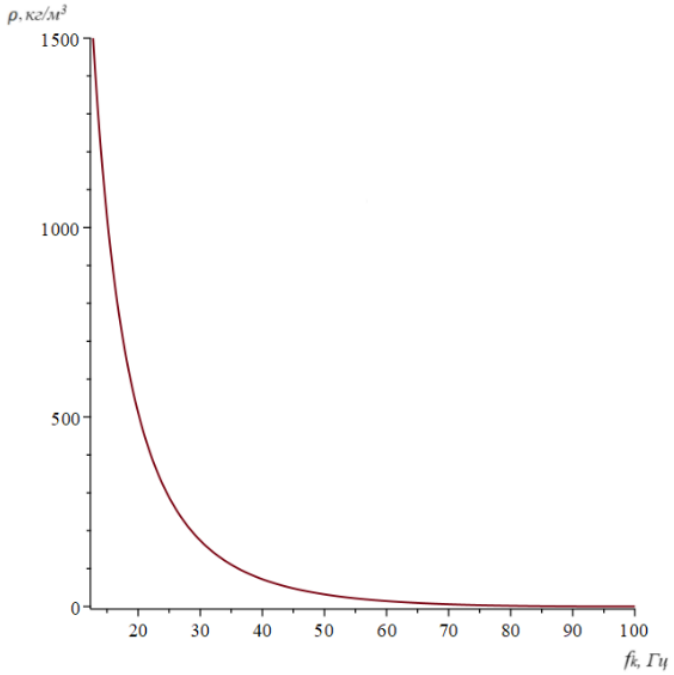


Рис.2.4. Графік залежності густини від частоти вимушених коливань під дією Коріолісових сил під час руху потоку по трубці

2.3 Оцінювання похибки квантування

Оцінювання похибки квантування здійснюється через рівняння перетворення мікропроцесорного фазометру. Знайдемо залежність між зсув фаз та часовим інтервалом:

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega \cdot (t_2 - t_1) = \omega \cdot t_x = 2\pi f_x \cdot t_x, \quad (2.14)$$

Звідки, залежність часового інтервалу t_x від МВ $Qm(\varphi)$ матиме вигляд:

$$t_x = \frac{Q_m(\varphi)}{2\pi f_x}. \quad (2.14)$$

Кількість імпульсів N, що надійшли на лічильник, розраховується за формулою:

$$N_x = \frac{t_x}{T_0} = t_x \cdot f_0. \quad (2.15)$$

Підставивши (2.14) у (2.15), отримаємо:

$$N_x = \frac{Q_m(\varphi)}{2\pi f_x} \cdot f_0. \quad (2.16)$$

Залежність кількості імпульсів від МВ представлена на рис. 2.5.

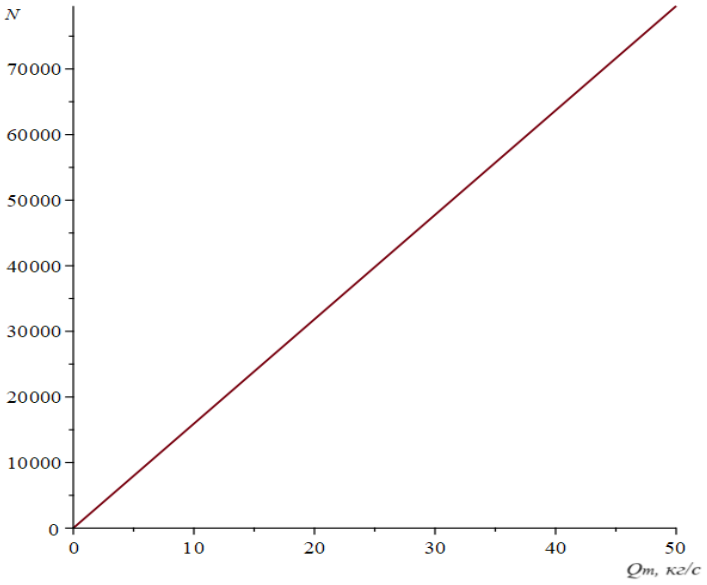


Рис. 2.5. Графік залежності кількості імпульсів від масової витрати

Значення похибки квантування мікропроцесорного частотоміра розраховується:

$$\delta_{kT} = \frac{1}{N} \cdot 100\% = \frac{2\pi f_x}{Q_m(\varphi) \cdot f_0} 100\% \quad (2.17)$$

Графік залежності похибки квантування від МВ представлено на рис. 2.6.

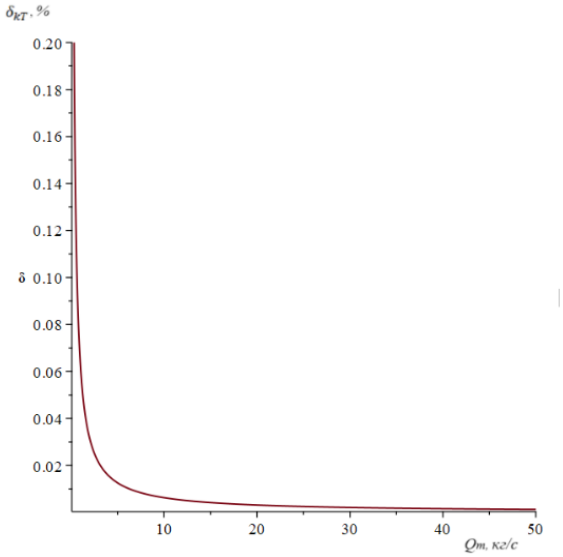


Рис. 2.6. Графік залежності похибки квантування від масової витрати

Динамічна похибка, яка обумовлена зміною вхідної величини під час вимірювання, розраховується за формулою [7]:

$$\Delta X_{Д} = \frac{1}{2} T_{д} \frac{dX}{dt}, \tag{2.18}$$

де $\Delta X_{Д}$ – динамічна похибка;

$T_{Д}$ – крок дискретизації;

$\frac{dX}{dt}$ – швидкість зміни вихідної величини.

Для оцінювання динамічної похибки вимірювання МВ ВК, необхідно виконати розрахунок за формулою:

$$\Delta X_{Д(Qm)} = \frac{1}{2} T_{д} \frac{dN}{dQ}, \tag{2.19}$$

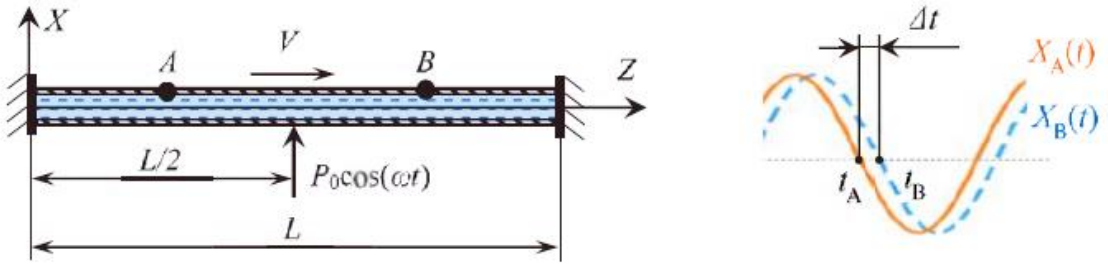
$$\Delta X_{Д(Qm)} = \frac{1}{2} T_{д} \frac{f_0}{2\pi f_x}, \tag{2.20}$$

$$\Delta X_{Д(Qm)} = \frac{1}{2} \cdot 0{,}01 \cdot \frac{10^6}{2\pi \cdot 100} = 7{,}96 \text{ т/с}. \tag{2.21}$$

2.4 Розрахунок динамічних метрологічних характеристик витратоміру Коріоліса

Завдання про усталені вимушені коливання прямої ВТ, що збуджуються через прикладення в центральному перерізі зовнішньої зосередженої сили і

потоком з постійною швидкістю однорідного середовища, вирішені в роботі [26]. Розрахункова схема прямої трубки з плинним середовищем показана на рис. 2.7а [27].



а) *б)*

Рис. 2.7. Графічне моделювання: а — розрахункова схема прямої трубки з певним потоком; б — тимчасова затримка сигналу датчиків А і В.

На вимірювальну трубку, під час проходження потоку по ній, діють інерційні, відцентрові і Коріолісові сили. Рівняння поперечних коливань трубки з урахуванням рідини, що тече з постійною відносною швидкістю *V*, має вигляд

$$(m_t + m_l)\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2m_l V\frac{\partial^2 x}{\partial t \partial z} + m_l V^2\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + EI\frac{\partial^4 x}{\partial z^4} = P_0\, cos(\omega t)\,\sigma_1\left(z - \frac{L}{2}\right), \quad (2.22)$$

де $(m_t + m_l)\frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$ — сили інерції ділянки трубки (m_t) з рідиною (m_l);

$2m_l V\frac{\partial^2 x}{\partial t \partial z}$ — сили Коріоліса, що діють потоком на ділянку трубки довжиною ∂z;

$m_l V^2\frac{\partial^2 x}{\partial z^2}$ — відцентрові сили, що діють потоком на ділянку трубки довжиною ∂z;

$EI\frac{\partial^4 x}{\partial z^4}$ — розподілене навантаження ділянки трубки довжиною ∂z;

$P_0\, cos(\omega t)$ — зовнішня сила, прикладена перпендикулярно осі трубки;

$\sigma_1\left(z - \frac{L}{2}\right)$ — імпульсна функція першого порядку (функція Дірака).

Вирішення завдання щодо збудження поперечних коливань прямої трубки з потоком, що має зовнішню зосереджену силу, знайдено в роботі [26] у вигляді розкладання форми сталих вимушених коливань трубки з потоком у ній, швидкість якого дорівнює нулю. У розкладанні враховані перші дві власні форми коливань і використано припущення про мінімальність діючих на трубку потоком

відцентрових сил в порівнянні з Коріолісовими силами і силами інерції. В результаті зроблено висновок про перехресний вплив власних форм коливань трубки: «перша форма впливає через потік на другу (але не впливає сама на себе), друга впливає на першу і не впливає сама на себе». Цей вплив викликає тимчасову затримку між коливаннями двох точок трубки, пропорційну швидкості потоку (масовій витраті).

Отримані результати в дослідження [21], показали, що при проведенні вимірювань витратоміром Коріоліса, таких фізичних величин, як МВ, густина та температура виникає перехідний режим роботи засобу вимірювання, при якому сигнал на його виході суттєво змінюється в часі. Це пов'язано з інерційністю засобу вимірювання. Реакція засобу вимірювання, через свої конструктивні особливості, на зміну параметрів потоку, наприклад, швидкість, густина, в'язкість потоку, під час вимірювання супроводжується затримкою в часі, що зумовлює появу динамічної похибки. Крім того, в цифрових засобах вимірювання спостерігається запізнення сигналу, обумовлене часом його перетворення в цифровий код. Тому, рівняння перетворення засобу вимірювання має бути сформовано для динамічного режиму вимірювання, яке адекватно описувало б залежність між вхідною та вихідною величинами, у вигляді диференційного рівняння. Тому, необхідно оцінити основні динамічні метрологічні характеристики ВК.

Основними динамічними характеристиками є: диференційне рівняння; імпульсна характеристика; перехідна характеристика; передавальна функція; сукупність амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик.

В рівнянні (2.22) представлена залежність сили Коріоліса від маси речовини, що протікає через трубопровід, кутової швидкості руху потоку через U-подібну трубку та швидкості потоку. Для дослідження впливу зміни швидкості потоку на точність витратоміру, необхідно створити умови при яких швидкість потоку буде змінюватись хаотично, що впливатиме на потужність сили Коріоліса та на відцентрові сили, що діють потоком на ділянку трубки із визначеною довжиною.

Для витратомірів Коріоліса, які використовують перетворення МВ у зсув фаз коливань витратомірної трубки, основним принципом є вимірювання ефекту

Коріоліса, що виникає при русі потоку рідини через вібруючу трубку. Це явище описується нелінійними диференційними рівняннями, що враховують сили, які діють на трубку і рідину.

Сила Коріоліса F_c визначається як:

$$F_c = 2m \cdot \omega \cdot v(t), \tag{2.22}$$

де F_c — сила Коріоліса;

m — маса рідини, [кг];

ω— кутова швидкість коливань трубки, [рад/с];

$v(t)$ — швидкість потоку рідини, [м/с].

В загальному випадку, диференційне рівняння руху для витратомірної трубки враховує баланс всіх сил:

$$m\frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + b\frac{d\varphi(t)}{dt} + k\varphi(t) = F_c + f(t). \tag{2.23}$$

де b — коефіцієнт демпфування;

k – жорсткість трубки;

$f(t)$ — зовнішня сила, що діє на трубку.

МВ визначається, як:

$$Q_m = \rho \cdot S \cdot v(t). \tag{2.24}$$

Виразимо силу Коріоліса через МВ:

$$F_c = 2m \cdot \omega \cdot \frac{Q_m}{\rho S} \tag{2.25}$$

Отже, квадратичне диференційне рівняння матиме вигляд:

$$m\frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + b\frac{d\varphi(t)}{dt} + k\varphi(t) = 2m \cdot \omega \cdot \frac{Q_m}{\rho S} + f(t). \tag{2.26}$$

Припустимо, що зовнішня сила f(t) є гармонійною, тобто:

$$\mathrm{f(t)} = \mathrm{F_0 sin\ (\omega t)}, \tag{2.27}$$

де F_0 — амплітуда зовнішньої гармонійної сили;

$sin(\omega t)$ — гармонійна функція, що описує зміну зовнішньої сили з часом.

Тоді, рівняння руху трубки матиме вигляд:

$$m\frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + b\frac{d\varphi(t)}{dt} + k\varphi(t) = 2m \cdot \omega \cdot \frac{Q_m}{\rho S} + F_0 sin\ (\omega t). \tag{2.27}$$

Це рівняння є нелінійним та другим по порядку. Де ліворуч записані інерційні, демпфуючі та пружні сили, а праворуч — сила Коріоліса та зовнішня збурююча сила.

Для розрахунку передаточної функції для диференційного рівняння ВК необхідно розглянути рівняння руху трубки в частотній області. Нехай диференційне рівняння має вигляд (2.27).

Знехтуємо зовнішньою силою $F_0\sin(\omega t)$ для отримання основної передавальної функції системи:

$$m\frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + b\frac{d\varphi(t)}{dt} + k\varphi(t) = 2m\cdot\omega\cdot\frac{Q_m}{\rho S}. \quad (2.28)$$

Розрахуємо передаточну функцію, що описує зв'язок між вхідним сигналом Q_m і вихідним сигналом $\varphi(t)$. Для цього необхідно перетворити диференційне рівняння в частотну область за допомогою перетворення Лапласа:

$$ms^2\varphi(p) + bs\varphi(p) + k\varphi(p) = 2m\cdot\omega\cdot\frac{Q_m(s)}{\rho S}. \quad (2.29)$$

Представимо у вигляді передавальної функції:

$$\varphi(p)(mp^2 + bp + k) = 2m\cdot\omega\cdot\frac{Q_m(s)}{\rho S} \quad (2.30)$$

Звідси:

$$\varphi(p) = \frac{2m\cdot\omega\cdot\frac{Q_m(s)}{\rho S}}{(mp^2+bp+k)}. \quad (2.31)$$

Передаточна функція ВК, має вигляд:

$$\mathrm{S(p)} = \frac{\varphi(\mathrm{p})}{\mathrm{Q_m(p)}} = \frac{\frac{2\mathrm{m}\cdot\omega}{\rho\mathrm{S}}}{(\mathrm{mp^2+bp+k})}. \quad (2.32)$$

Розрахунок перехідної характеристики для диференційного рівняння ВК передбачає знаходження розв'язку диференційного рівняння при реакції системи на одиничний ступінчатий сигнал (функція Хевісайда) на вході. Для оцінки перехідної характеристики використаємо передавальну функцію системи і знайдемо її обернене перетворення Лапласа.

Для витратоміра Коріоліса ми маємо передаточну функцію, вихідний величин:

$$\mathrm{S(p)} = \frac{1}{(\mathrm{mp^2+bp+k})}. \quad (2.33)$$

Одиничний ступінчастий сигнал (функція Хевісайда) *φ(t)* в зображені Лапласа представлена як:

$$\mathcal{L}\{\varphi(t)\} = \frac{1}{p}. \tag{2.34}$$

Перехідна характеристика *φ(t)* в часі – це обернене перетворення Лапласа від добутку передавальної функції і одиничного ступінчастого сигналу:

$$Y(p) = S(p) \cdot \frac{1}{p} = \frac{1}{p \cdot (mp^2 + bp + k)}. \tag{2.35}$$

Для оберненого перетворення Лапласа потрібно розкласти *Y(p)* на прості дроби. Знайдемо корені характеристичного рівняння:

$$mp^2 + bp + k = 0. \tag{2.36}$$

Корені рівняння:

$$p_{1,2} = \frac{-b}{2m} \pm j\omega_d, \tag{2.37}$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{4mk - b^2}{2m}}. \tag{2.38}$$

Розкладемо *Y(p)* на прості дроби:

$$Y(p) = \frac{1}{p \cdot (\mathrm{mp^2 + bp + k})} = \frac{A}{p} + \frac{Bp + C}{\mathrm{mp^2 + bp + k}} \tag{2.39}$$

Знайдемо коефіцієнти *A, B, C*:

$$\mathrm{A} = \frac{1}{k}, \tag{2.40}$$

$$B = -\frac{1}{k}, \tag{2.41}$$

$$C = \frac{b}{k}. \tag{2.42}$$

Обернене перетворення Лапласа для кожного коефіцієнта:

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{p}\right\} = 1, \tag{2.43}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{p}{\mathrm{mp^2 + bp + k}}\right\} = e^{-\frac{b}{2m}t}\cos(\omega_d t), \tag{2.44}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{\mathrm{mp^2 + bp + k}}\right\} = \frac{1}{\omega_d} e^{-\frac{b}{2m}t} sin(\omega_d t), \tag{2.45}$$

Таким чином, перехідна характеристика *φ(t)* матиме вигляд:

$$h(t) = \frac{1}{k} - \frac{1}{k} e^{-\frac{b}{2m}t}\left(\cos(\omega_d t) + \frac{b}{2m\omega_d} sin(\omega_d t)\right) \tag{2.46}$$

$$h(t) = \frac{1}{k}\left(1 - e^{-\frac{b}{2m}t}\left(\cos(\omega_d t) + \frac{b}{2m\omega_d} sin(\omega_d t)\right)\right) \quad (2.47)$$

Графічне подання перехідної характеристики ВК рівним представлено на рис.2.8. при:

- маси витратомірної трубки (m) = 1 кг,
- жорсткість пружини (k) = 2 Н/м,
- коефіцієнті демпфування (b) = 1 кг/с.

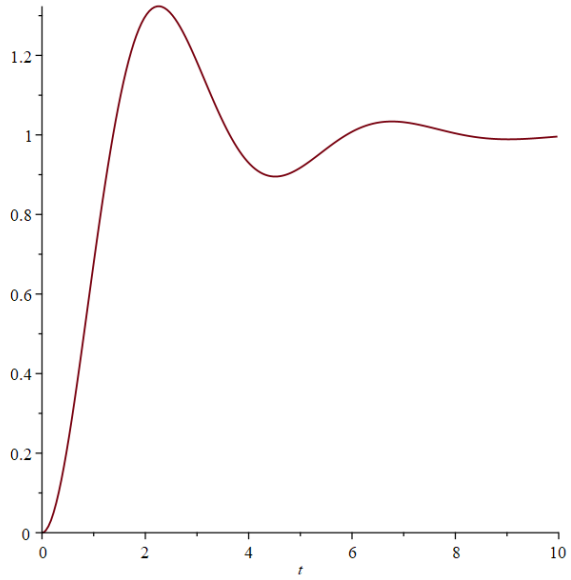


Рис. 2.8. Графічне зображення перехідної характеристики ВК

Для розрахунку імпульсної характеристики системи, визначеної диференційним рівнянням, необхідно вирішити рівняння з дельта-функцією Дірака на вході. Розглянемо основне рівняння ВК та спростимо його, розглянувши тільки частину, яка описує гармонійні коливання без врахування додаткових сил:

$$m\frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + b\frac{d\varphi(t)}{dt} + k\varphi(t) = \delta(t) \quad (2.48)$$

Застосуємо перетворення Лапласа до цього рівняння, враховуючи, що $\mathcal{L}[\varphi(t)] = U(p)$ і $\mathcal{L}[\varphi(t)] = 1$, отримаємо:

$$mp^2U(p) + bpU(p) + kU(p) = 1. \quad (2.49)$$

Передавальна функція S(p) визначається як:

$$S(p) = \frac{U(p)}{1} = \frac{1}{mp^2+bp+k}. \quad (2.50)$$

Тепер знаходимо зворотне перетворення Лапласа для отримання імпульсної характеристики *δ(t)*. Представимо *S(p)* у наступному вигляді для знаходження зворотного перетворення:

$$S(p) = \frac{1}{m\left(p^2+\frac{bp}{m}+\frac{k}{m}\right)}. \quad (2.51)$$

Позначимо:

$$\alpha = \frac{b}{2m}, \quad (2.52)$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}. \quad (2.53)$$

Тоді:

$$S(p) = \frac{1}{m\left((p+\alpha)^2+\omega_0^2-\alpha^2\right)}. \quad (2.54)$$

Застосовуємо зворотне перетворення Лапласа:

$$\delta(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{m\left((p+\alpha)^2+\omega_0^2-\alpha^2\right)}\right]. \quad (2.55)$$

Визначимо імпульсну характеристику з врахуванням параметрів системи:

$$\delta(t) = \frac{1}{m\sqrt{\omega_0^2-\alpha^2}} e^{-1\frac{b}{2m}t} sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}-\left(\frac{b}{2m}\right)^2}\, t\right). \quad (2.56)$$

Ця формула описує імпульсну характеристику диференційного рівняння ВК, що залежить від маси витратомірної трубки, жорсткість пружини, коефіцієнті демпфування.

2.5 Методи обробки сигналів витратоміру Коріоліса

ВК забезпечує пряме і точне вимірювання МВ і густини однофазної рідини. Ця можливість призвела до його широкого промислового застосування протягом декількох десятиліть. ВК має два основних компоненти: витратомірну трубку, з типовими двома датчиками швидкості, і, щонайменше, один збуджувач, щоб викликати коливання витратомірної трубки; і передавач, вбудовану систему для обробки сигналів, вимірювання та контролю. Так, наприклад, на рисунку 1 показана типова пара сигналів датчиків під час контролю потоку однофазної рідини зі сталою швидкістю потоку, а на рис. 2.9 показані відповідні сигнали, коли швидкість потоку змінюється та наявний пульсуючий потік. Демпфірування

витратомірної трубки постійно змінюється, відповідно до швидкість потоку суміші та її густини. Ці зміни призводять до набагато більшої варіації частоти, амплітуди і різниці фаз відповідних сигналів датчиків. Відповідно, обробка сигналу для ВК в умовах наявності пульсуючого потоку вимагає додаткових методів.

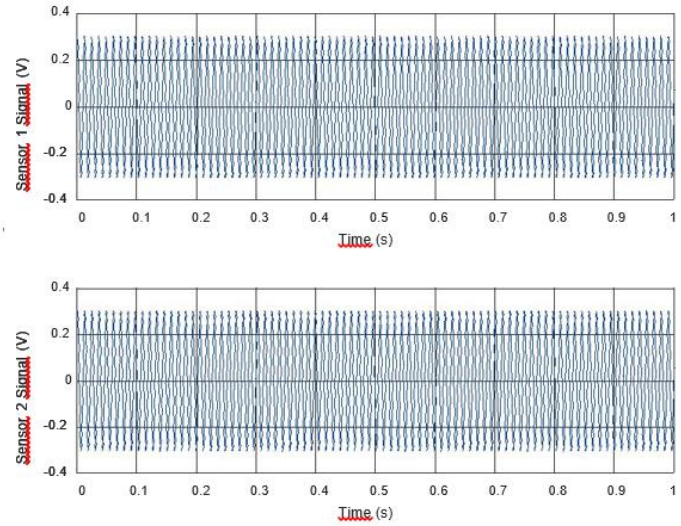


Рис. 2.9. Сигнали датчиків витратоміру Коріоліса з сталою швидкістю потоку

Важливим аспектом, роботи ВК, як було визначено в раніше, є тимчасова затримка між входом датчика і виходом приводу. Так як основна умова для роботи ВК є підтримка коливань витратомірної трубки, як правило, при фіксованій амплітуді, оброблений сигнал драйвера генеруються для того, щоб бути в фазі з сигналом датчика.

У цьому процесі, тимчасова затримка грає важливу роль у визначенні якості контроля амплітуди. З потоком зі сталою швидкістю, час затримки в системі контролю витратомірної трубки менш важливий, так як сигнали датчиків більш стабільні.

Але з наявністю пульсуючого потоку, як показано на рис. 2.10, затримка за часом в системі контролю витратомірної трубки стає все більш важливим фактором у регулюванні коливань, що швидко змінюються.

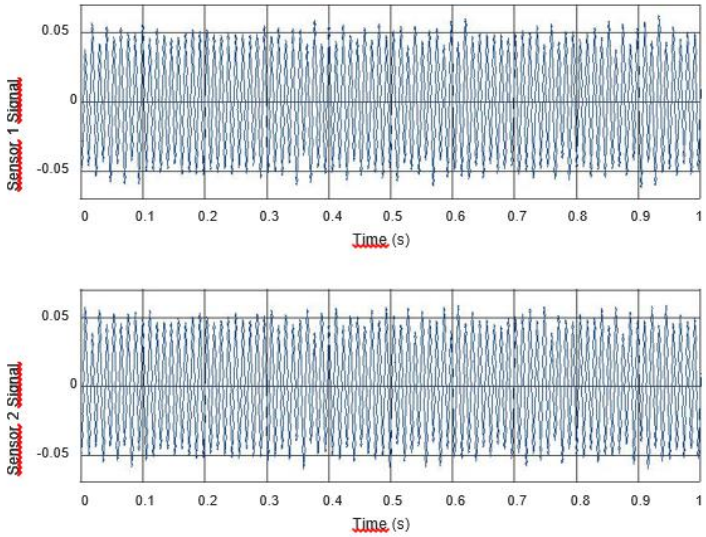


Рис. 2.10. Сигнали датчиків витратоміру Коріоліса із змінною швидкістю потоку та наявності пульсуючого потоку.

Ще одна проблема, викликана наявністю пульсуючого потоку є збільшення механічного демпфування ВТ. Як проілюстровано вище, порівняння рис. 2.9 із рис. 2.10, сильне загасання часто призводять до більш низької амплітуді коливань, так як максимальна енергія приводу, як правило, обмежена. З меншою та різною амплітудою, і більш високого рівня фонового шуму, значно знижується при вимірювані пульсуючого потоку, відношення сигнал-шум, і тому придушення шумів також має важливе значення.

З цифровим драйвером, тимчасові затримки відбуваються між датчиком і драйвером сигналів через аналого-цифровий перетворювач і цифро-аналоговий перетворювач операцій, обробки сигналів і фазової синхронізації. Слід зазначити, що більша частина цієї затримки через сам процес вимірювання, тобто отримання інформації частоти, фази і амплітуди з сигналу датчика. Зведення до мінімуму цієї затримки покращує точність вимірювання амплітуди та зсуву фаз, що безпосередньо покращує точність вимірювання МВ.

Сучасні методи обробки сигналів ВК включають в себе перетворення Гілберта, що досліджено в роботах [28] - [31], а також поєднання адаптивного режекторного фільтра для частоти відстеження разом з дискретним перетворенням Фур'є для розрахунків амплітуди і фази, що досліджено в роботах [32], [33].

Ці методи добре працюють при однофазному, сталому стані потоку, так як всі параметри є відносно стабільним.

Таким чином, точне відстеження сигналів датчиків ВК, за умови, що змінюється в часі амплітуда і частота, а також при мінімізації затримки вимірювання, є важливими питаннями для витратомірів Коріоліса, які вимірюють потік із нестабільною швидкістю потоку.

В роботі [34] представлені дослідження та розроблені три складні методи обробки сигналів- комплексний смуговий фільтр, комплексний режекторний фільтр і комплексний смуговий фільтр з комплексним режекторним фільтром. Основна ідея полягає в придушенні негативною частоти сигналу датчика, для того щоб генерувати відповідну аналітичну форму, з якої кожне необхідного значення параметра може бути обчислені. Крім того, в зв'язку з їх природною смуговий власністю, нові методи повинні не вимагатимуть попередньої фільтрації, тим самим зменшуючи затримку за часом і матимуть здатність пригнічувати шум.

Далі наведено огляд сучасних методів відстеження амплітуди, частоти та фазового зсуву сигналів від Коріолісових вимірювачів.

Розглянуті наступні методи: дискретне перетворення Фур'є, адаптивний режекторний фільтр, перетворення Гілберта. Особлива увага приділяється вимірюванню різниці фаз сигналів, оскільки це основний параметр, який визначає витрату речовини.

Класичним методом оцінки частоти сигналу є визначення піка його перетворення Фур'є. Після визначення частоти за допомогою дискретного перетворення Фур'є можна визначити амплітуду та різницю фаз сигналів. Опишемо "класичний" спосіб вимірювання різниці фаз за допомогою дискретного перетворення Фур'є. Нехай маємо два сигнали однакової частоти:

$$x_1(n) = A_1 \cos(\omega n + \theta_1), \quad (2.57)$$
$$x_2(n) = A_2 \cos(\omega n + \theta_2),$$
$$n = 0,1 \dots N-1,$$

де A_1 та A_2 – амплітуди;

θ_1 та θ_2 - початкові фази сигналів.

Позначимо через ώ оцінку для значення ω частоти.

Дискретне перетворення Фур'є сигналів x_1(n), x_2(n) в точці ώ може бути знайдено із використанням формули Ейлера за формулою:

$$X_{1,2}(ώ) = \sum_{n=0}^{N-1} A_{1,2} cos\left(\omega n + \theta_{1,2}\right) e^{-jώn}, \tag{2.58}$$

$$X_{1,2}(ώ) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_{1,2}}{2} \left[e^{j(ώn+\theta_{1,2})} + e^{-j(ώn+\theta_{1,2})}\right] e^{-j(ώn)} . \tag{2.59}$$

Якщо у наведеній рівності знехтувати доданками з негативною частотою, то отримаємо:

$$X_{1,2}(ώ) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_{1,2}}{2} e^{j(ώn+\theta_{1,2})} e^{-j(ώn)} = \begin{cases} \frac{A_{1,2}}{2} \cdot \frac{sin\frac{N(ώ-\omega)}{2}}{sin\frac{ώ-\omega}{2}} e^{j\left(\theta_{1,2}+\frac{N(ώ-\omega)}{2}-\frac{ώ-\omega}{2}\right)}, \\ \frac{A_{1,2}}{2} N e^{j\theta_{1,2}}, \text{ якщо } ώ = \omega. \end{cases} \tag{2.60}$$

Позначимо аргументи X_1(ώ), X_2(ώ) через φ_1, φ_2 . Тоді потрібна різниця фаз може бути знайдена за формулою:

$$\Delta\theta = \varphi_2 - \varphi_1. \tag{2.61}$$

Для ефективної роботи в реальному часі зазвичай використовують рекурентне цей метод. Однак, дискретне перетворення Фур'є не може гарантувати високої частотної роздільної здатності у разі швидко мінливих сигналів із сенсорів коріолісового витратоміра.

Відстеження швидкої зміни параметрів сигналів передбачає короткі часові відрізки для обробки, а це призводить до малої дискретизації за частотою. Тому досить часто за допомогою цього методу оцінюється лише зміна зсуву фаз, а частота сигналу знаходиться іншим методом, наприклад, за допомогою адаптивного режекторного фільтра.

Адаптивний режекторний фільтр давно і успішно застосовується для відстеження частоти сигналів Коріолісових витратомірів завдяки своїй стійкості до шумів і високої точності. Зазвичай адаптивний режекторний фільтр доповнюється дискретним перетворенням Фур'є для відстеження амплітуди та різниці фаз. Структура адаптивного режекторного фільтру представлена на рис. 2.11.

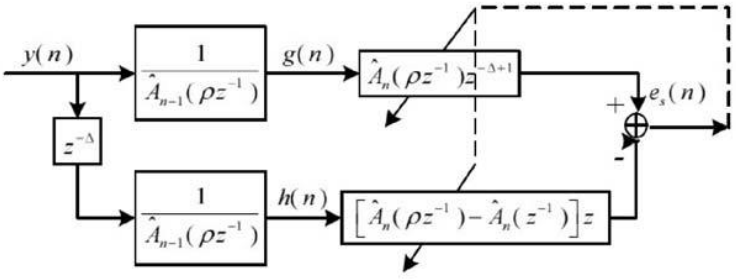


Рис. 2.11. Структура адаптивного режекторного фільтру

Передатна функція адаптивного режекторного фільтру описується наступною формулою:

$$H(z) = \frac{A_{n(z^{-1})}}{A_n(\rho z^{-1})} = \prod_{k=1}^{m} \frac{1+a_k(n)z^{-1}+z^{-2}}{1+\rho_k(n)a_k(n)z^{-1}+\rho_k^2(n)z^{-2}}, \quad (2.62)$$

де m – число відстежуваних частот, для сигналів з коріолісового витратоміра.

Множник $\rho_k(n)$ визначає смугу пропускання адаптивного режекторного фільтру:

$$BW = 2cos^{-1}\left(2\rho_k(n)/\left(1+\rho_k^2(n)\right)\right). \quad (2.63)$$

Спочатку ця смуга досить широка, щоб захопити частоту сигналу витратоміра, потім звужується для того, щоб знайти цю частоту з великою точністю.

$$\rho_k(n) = \rho_0\rho_k(n-1) + (1-\rho_0)\rho_\infty, \quad (2.64)$$

Ваговий коефіцієнт визначається, як:

$$a_k(n) = -2cos\omega_k(n), \quad (2.65)$$

де $\omega_k(n)$ – оцінка частоти, що налаштовується за допомогою формули:

$$a(n+1) = a_k - P(n)\psi(n)e_s(n), \quad (2.66)$$

де $e_s(n)$ – вихід адаптивного режекторного фільтру, $\psi(n)$ – функція градієнта.

Функція градієнта визначається як:

$$\psi(n) = \frac{\partial e_s(n)}{\partial a_k(n)} = \frac{y(n-1)-\rho_k(n)e_s(n-1)}{1+\rho_k(n)a_k(n)z^{-1}+\rho_k^2(n)z^{-2}}, \quad (2.67)$$

$$P(n) = \frac{(1-\lambda(n))P(n-1)}{\lambda(n)+\psi^2(n)P(n-1)}, \quad (2.68)$$

$$\lambda(n) = \lambda_0\lambda(n-1) + (1-\lambda_0)\lambda_\infty, \quad (2.69)$$

де $\lambda(n)$ – темп затухання.

Описаний метод досить чутливий до швидких змін амплітуди, характерних для роботи коріолісового витратоміра при хаотичній зміні швидкості потоку.

Перетворення Гілберта найбільш поширене для обробки сигналів з Коріолісових витратомірів. Нехай, як і раніше, дано два сигнали однієї частоти. За допомогою перетворення Гілберта сформуємо з аналізованих сигналів аналітичні сигнали:

$$z_1(n) = A_1 e^{i(\omega n+\theta_1)}, \quad (2.70)$$
$$z_2(n) = A_2 e^{i(\omega n+\theta_2)}.$$

І розглянемо наступний вираз:

$$\overline{z_1(n)} z_2(n) = A_1 A_2 e^{i(\theta_2-\theta_1)} = A_1 A_2 e^{i\Delta\theta}. \quad (2.71)$$

Звідси, різниця фаз:

$$\Delta\theta = arg\overline{z_1(n)} z_2(n). \quad (2.72)$$

Амплітуди сигналів знайдемо як абсолютні величини відповідних сигналів:

$$A_{1,2} = \left|z_{1,2}(n)\right|. \quad (2.73)$$

Для визначення частоти ω розрахуємо добуток двох сусідніх відгуків аналітичного сингалу:

$$\overline{z_1(n-1)} z_1(n) = A_1^2 e^{-i(\omega(n-1)+\theta_1)} e^{i(\omega n+\theta_1)} = A_1^2 e^{i\omega}. \quad (2.74)$$

Звідси отримуємо, що частота дорівнює:

$$\omega = arg\overline{z_1(n-1)} z_1(n). \quad (2.75)$$

Отже, описаний метод, що ґрунтується на перетворенні Гілберта, дозволяє відстежувати всі параметри сигналу з досить високою точністю. З недоліків методу варто відзначити чутливість до шуму та необхідність попередньої фільтрації сигналу.

За результатами обробки сигналу зазначеними вище методами, можна зробити висновок, що, незважаючи на помилку оцінки частоти, що сильно змінюється, при використанні перетворення Гілберта, цей метод не призводить до великої похибки оцінки амплітуди та зсуву фаз. Навпаки, похибка оцінки частоти, що повільно змінюється, адаптивним режекторним фільтром, веде в подальшому

до поганого відстеження зміни амплітуди і зсуву фаз методом дискретного перетворення Фур'є.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

В розділі 2, було виконано графічне та математичне моделювання витратомірної трубки ВК. Було виконано аналіз відомих функцій перетворення та визначені переваги та недоліки кожної.

Було сформовано функцію перетворення ВК. За отриманою формулою рівняння перетворення можна зробити висновок, що МВ ВК прямо пропорційна зсуву фази амплітуди руху ВТ на які діють сили Коріоліса під час протікання середовища, МВ якої вимірюється. А густина пропорційна зміні частоті вібрації ВТ ВК, під час протікання середовища через неї, густина якого вимірюється.

Оцінено похибку квантування, а також, оцінені динамічні метрологічні характеристики ВК, а саме: виведено диференційне рівняння другого порядку; передаточну функцію; перехідну характеристику; імпульсну характеристику. Наведені графіки відповідних характеристик.

Виконано математичне моделювання та дослідження ВК в умовах зміни швидкості потоку НП.

Виконано аналіз відомих методів обробки сигналів ВК, а саме: дискретне перетворення Фур’є; перетворення Гілберта; використання адаптивного режекторного фільтру. Визначені переваги та недоліки кожного з них.

РОЗДІЛ 3
УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИТРАТОМІРУ КОРІОЛІСА У СКЛАДІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ НАЛИВУ

3.1 Розробка функціональної мікропроцесорної схеми інформаційно-вимірювальної системи витратоміру Коріоліса

На рис. 3.1. представлена функціональна мікропроцесорна схема ІВС ВК.

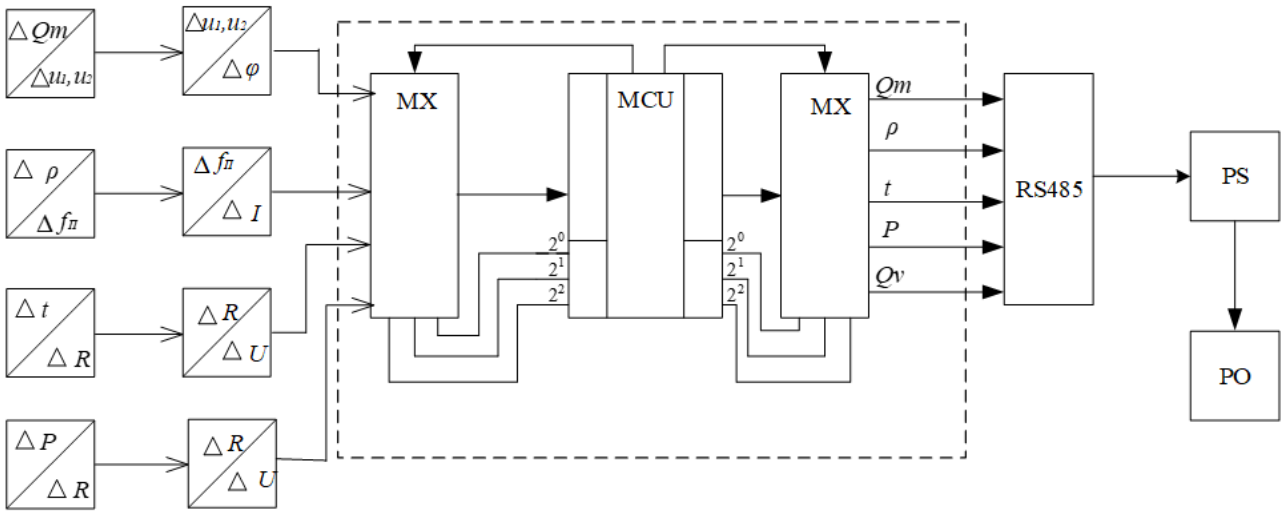


Рис. 3.1. Функціональна мікропроцесорна схема інформаційно-вимірювальної системи витратоміру Коріоліса

Схема складається з вимірювальних каналів МВ, густини потоку, температури та тиску [35].

Вимірювань канал МВ складається з ПВП МВ в амплітуди коливань витратомірних трубок ВК. Амплітуди коливань витратомірних трубок за допомогою ВВП, що реалізовано за допомогою мікропроцесору, який був розглянутий у підрозділі 1.2.2, перетворюється у фазовий зсув. Фазовий зсув прямо пропорційний масовій витраті [36], [37].

Інформаційно-вимірювальний канал (ІВК) густини потоку складається з ПВП густини потоку в частоту коливань витратомірної трубки. За допомогою ВВП, що реалізований як частотомір миттєвих значень із використанням

мікропроцесору, перетворюється з електричний струм, який прямо пропорційний густині потоку. Відношення частоти коливань при пустих витратомірних трубках та частоти коливань при заповнених, являє залежність, що характеризує значення густини.

ІВК температури потоку складається з ПВП температури потоку у електричний опір, за допомогою термоперетворювачу опору. За допомогою ВВП, електричний опір перетворюється у напругу, яка є пропорційною вимірюваній температурі потоку [38].

ІВК тиску потоку на виході ВК у ПВП тиску перетворюється у опір. За допомогою ВВП, електричний опір перетворюється у напругу, яка є пропорційною вимірюваному тиску потоку [39]. Про додатковий канал вимірювання тиску, а також, про вибір методу за засобу вимірювання надлишкового тиску, представлено у підрозділі 3.2.

Інформація з вимірювальних каналів надходить до мікропроцесору *MCU* через цифровий мультиплексор *MX*. Після обробки сингалів *MCU* виміряні значення за кожним ІВК у вигляді цифрового коду, поступають через мультиплексор *MX* та інтерфейс RS485 до персонального комп'ютеру *PS* [40]. Вихідними сингалами з *MCU* є: значення МВ Q_m (токовий, імпульсний та частотний виходи); значення густини потоку ρ; значення температури t; значення тиску p; розрахункове значення ОВ Q_V. У програмі збору та аналізування даних відбувається розрахунок масу та об'єм потоку НП, що пройшли через ВК, розрахунок густини приведеної до 20°С, а також, розрахунок індексу пульсацій та додаткових неінформативних параметрів потоку [41].

Способи розрахунку неінформативних параметрів потоку представлені у підрозділі 5.1. Після чого, в залежності від значень неінформативних параметрів визначається необхідність у зміні положення регулюючого органу *PO*. За команди з персонального комп'ютеру відбувається зміна положення *PO*, що змінює тиску у трубопроводі на виході з ВК, тим самим приводячи неінформативні параметри до нормованих значень [42].

3.2 Методи та засоби вимірювання надлишкового тиску

Розглянемо основні засоби вимірювальної техніки, використовуючи які, можливо здійснити контроль зміни швидкості потоку, відповідно масову витрату та тиску рідини у трубопроводі:

- манометри вимірюють тиск у трубопроводі і можуть бути різних типів, таких як абсолютні, гідростатичні, диференційні тощо. Вони дозволяють вимірювати тиск у порівнянні з атмосферним тиском або між двома точками у трубопроводі;
- електричні датчики тиску перетворюють механічний тиск на електричний сигнал, який потім може бути зчитаний та оброблений електронною системою контролю. Електричні датчики тиску встановлюються в трубопроводі для постійного вимірювання тиску і передачі цих даних на відповідне обладнання для моніторингу та аналізу;
- оптичні датчики використовують лазерне або світлодіодне випромінювання для вимірювання пульсацій в газоподібних або рідких середовищах;
- акустичні датчики вимірюють звукові хвилі, що виникають в результаті пульсацій у рідині або газі.

Ці засоби вимірювальної техніки можуть бути використані окремо або в поєднанні для отримання більш точних результатів вимірювань індексу пульсації, наявності двофазного потоку чи зміни тиску у трубопроводі. Розглянемо більш детально, кожен із них.

Контроль параметрів потоку за допомогою вимірювання тиску у трубопроводі є одним з основних методів моніторингу і контролю процесів.

Тиск - рівномірно розподілена сила, що діє на одиницю площі поверхні перпендикулярно до цієї поверхні:

$$P = \frac{F}{S}, \tag{3.1}$$

де P – тиск [бар];

F – сила [Н];

S – площа поверхні [м^2].

При нерівномірному розділу натиску в даній точці визначається як відношення нормальної складової сили, що діє на малий елемент поверхні, до його площі:

$$P = \frac{dF}{dS}. \tag{3.2}$$

Атмосферний тиск створюється масою повітряного стовпа земної атмосфери. Він має змінну величину, залежну від висоти над рівнем моря, географічної широти та метеорологічних умов.

Абсолютний тиск - це повний тиск всередині будь-якої системи, в якій знаходиться газ, пар або рідина, визначається як сума атмосферного тиску та надлишкового. Він вимірюється відносно ідеального вакууму за допомогою абсолютної шкали [35].

Надлишковий тиск визначається як різниця між абсолютним тиском та атмосферним тиском. Надлишковий тиск вимірюється відносно тиску навколишнього повітря.

$$P_{\text{н}} = P - P_A\ , \tag{3.3}$$

де P_H – надлишковий тиск;

P – абсолютний тиск;

P_A – атмосферний тиск.

Під вакуумом (або рідше, рідкісним середовищем) розуміється стан газу, при якому тиск нижче атмосферного. Кількісно вакуумметричний тиск визначається як різниця між атмосферним тиском та абсолютним тиском всередині вакуумної системи.

$$P_{\text{В}} = P_A - P, \tag{3.4}$$

де P_B - вакуумметричний тиск.

Статичний тиск - це тиск, який залежить від запасу потенційної енергії газового середовища або рідини і визначається статичним напором. Він може бути надлишковим або вакуумним, у деяких випадках може дорівнювати атмосферному [35].

Динамічний тиск - це тиск, обумовлений швидкістю руху потоку газу або рідини [35]. Визначається він через кінетичний (динамічний) напір за наступною формулою:

$$P_d = \rho \frac{v^2}{2}, \tag{3.5}$$

де P_d – динамічний тиск;

ρ – густина рідини;

υ – швидкість потоку.

Повний тиск рухомого середовища складається зі статичного та динамічного тисків:

$$P_n = P_c + P_d \tag{3.6}$$

де, P_n – повний тиск;

P_c - статичний тиск.

Засоби вимірювання тиску класифікуються наступним чином.

За методом вимірювання: рідині, деформаційні, вантажопоршневі, електричні.

За видом вимірюваного тиску: манометри, вакуумметри, диференційні манометри, барометри.

Деформаційні тискові вимірювальні пристрої ґрунтуються на балансуванні сили, створеної тиском або вакуумом контрольованого середовища, на чутливому елементі, силами пружних деформацій різних типів або різних розмірів пружних елементів. Ця деформація у вигляді лінійних або кутових зміщень передається реєструючому пристрою, (індикатору або записуючому приладу) або перетворюється в електричний або пневматичний сигнал для дистанційної передачі.

Для чутливих елементів в деформаційних вимірювальних пристроях використовуються [35]: одновиткові трубчасті пружини; багатовиткові трубчасті пружини; пружні мембрани; пружні мембранні коробки; подвійні пружні мембранні коробки; пружино-мембранні з гнучкою мембраною [43].

Електронні датчики тиску базуються на властивості деяких матеріалів змінювати свої електричні параметри під дією тиску.

Основні типи електронних СТ: тензометричні; п'єзоелектричні; термопровідні; іонізаційні.

П'єзоелектричні манометри використовуються для вимірювання пульсуючого з високою частотою тиску в механізмах з допустимим навантаженням на чутливий елемент до $8 \cdot 10^3$ ГПа. Будова п'єзоелектричного манометру зображена на рис 3.2.

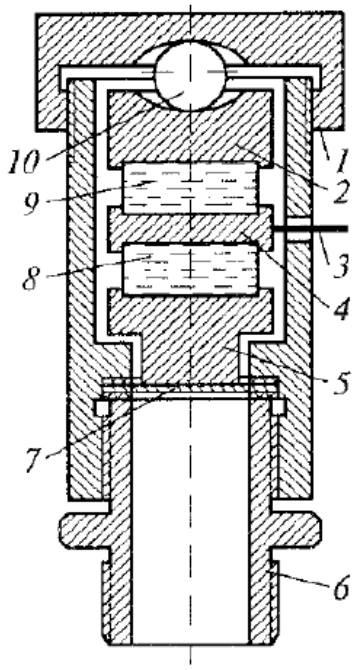


Рис 3.2 П'єзоелектричний манометр: 1 – кришка; 2- металева прокладка; 3– ізольований провідник; 4 – прокладка; 5- металева прокладка; 6 – штуцер; 7 – мембрана; 8 та 9 – п'єзоелементи; 10 -кулька.

Чутливим елементом, який перетворює механічні напруження в коливання електричного струму, є пластини циліндричної або прямокутної форми товщиною кілька міліметрів з кварцу, титанату барію або кераміки типу цирконат-титанат свинцю.

Принцип дії п'єзоелектричного манометру полягає у наступному. Тиск, який вимірюється через мембрану *7*, діє на п'єзоелементи *9* і *8*, розташовані так, що на їх внутрішніх гранях, що контактують з металевою прокладкою *4*, утворюються однойменні заряди. Потенціал внутрішніх граней пластин знімається ізольованим провідником *3*, приєднаним до прокладки *4*, а зовнішніх граней п'єзоелементів -

через корпус, металеві прокладки *2* і *5*, мембрану *7* і кулька *10*, кришку *1*. Штуцер *6*, що стискає мембрану *7*, використовується для з'єднання чутливого елемента з об'єктом вимірювання.

Тензометричний манометр має циліндричний корпус *4*, який у верхній частині утворює пружною мембрану, а в нижній - штуцер для подачі вимірюваного тиску *P*. До мембрани припаяна кругла сапфірова пластина *1*, на поверхню якої нанесені тонкі плівкові напівпровідникові тензорезистори *R1...R4* із монокристалічного кремнію. Тензорезистори за допомогою вивідних проводів *5* з'єднані зі збірними пластинами *2*, закріпленими на кільці з діелектрика *3*. Тиск вимірюється за допомогою схеми незрівноваженого моста, плечами якого є тензорезистори *R1...R4*. Будова тензометричного манометру зображена на рис 3.3 [7].

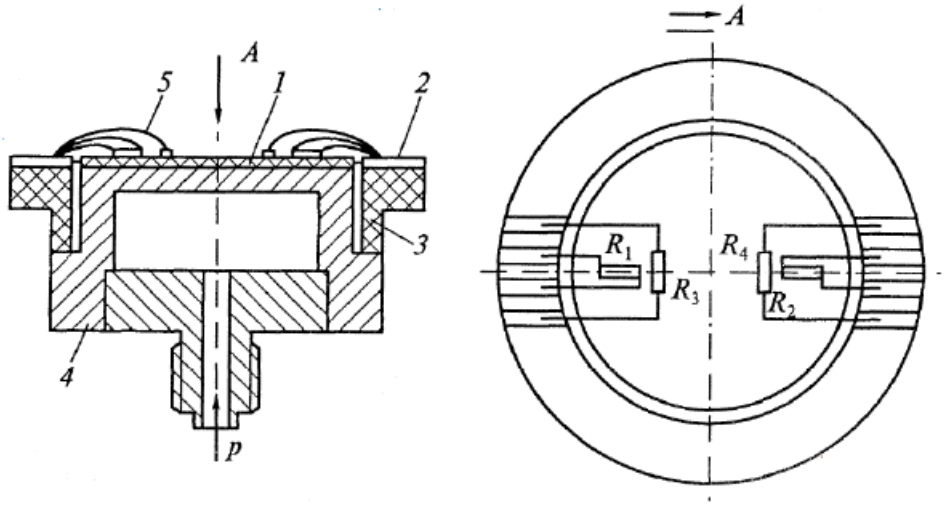


Рис 3.3 Тензометричний манометр: 1 – сапфірова пластина; 2- збірні пластини; 3– діелектрик; 4 – циліндричний корпус; 5- вивідні проводи.

Сенсор тиску (СТ) складається з первинного перетворювача тиску, який включає чутливий елемент, схему вторинної обробки сигналу та пристрої виводу інформаційного сигналу.

У сучасній промисловості найбільш поширеними є датчики тиску, вакууму і диференційні датчики тиску з електричними аналоговими вихідними сигналами.

Вихідні сигнали:

- сигнали струму: 0-5; 0-20; 4-20 мА;

- сигнали напруги: 0-10; 0-5; 0-1 В.

Для вимірювання тиску у трубопроводі, вибрано високочутливий датчик із діапазоном вимірювання від 0 до 40 бар та уніфікованим вихідним сигналом 4-20мА. Датчик представлено на рис.3.4.

Рис. 3.4 Сенсор тиску, що використовувався у експериментальній установці.

СТ буде підключений до моніторингової системи, яка автоматично відслідковує та реєструє зміни тиску у реальному часі.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Розроблено функціональну мікропроцесорну схему ІВС ВК. Схема складається з вимірювальних каналів МВ, густини потоку, температури і тиску, мікроконтролеру, інтерфейсу, персонального комп’ютеру та РО.

Представлено аналіз відомих методів та засобів вимірювання тиску потоку рідини у трубопроводі. Визначено переваги та недоліки кожного з них. Вибрано метод та засіб вимірювання тиску, для виконання експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ НАФТОПРОДУКТІВ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТОМІРУ КОРІОЛІСА

Для перевірки теоретичних розрахунків необхідно провести експериментальне дослідження із врахуванням факторів, що впливають на точність вимірювання ВК, а саме, зміна швидкості потоку НП під час вимірювання, що супроводжується зміною тиску в вимірювальних трубках ВК і відповідно зміною МВ.

Основні завдання:

- визначити основні складові АСН;
- розробити структурну схему експериментальної установки;
- виконати вимірювання із контролем зміни індексу пульсації;
- виконати вимірювання МВ витратоміром Коріоліса у складі АСН при індексі пульсації значення якого не перевищує 0,1. Оцінити систематичну похибку за каналом вимірювання МВ, ОВ, густини та температури. Оцінити невизначеність результатів вимірювань.
- виконати вимірювання МВ витратоміром Коріоліса у складі АСН при індексі пульсації значення якого не перевищує 0,001 із застосуванням удосконаленої ІВС. Оцінити систематичну похибку результатів вимірювання за каналом вимірювання МВ, ОВ, густини та температури. Оцінити невизначеність результатів вимірювань.
- порівняти оцінки систематичних похибок результатів вимірювання та оцінок невизначеності результатів вимірювання при застосуванні зразкових засобів;
- оцінити зменшення похибки вимірювання за рахунок оцінки індексу пульсації та приведення до нормованого значення, згідно критерію, під час вимірювання;
- зробити висновок, про адекватність запропонованого методу.

4.1 Розробка установки для експериментальних досліджень впливу зміни параметрів потоку нафтопродуктів на точність вимірювання витратоміру Коріоліса

Розроблена структурна схема АСН із описом основних елементів системи для експериментальних досліджень зображена на рис. 4.1 [44].

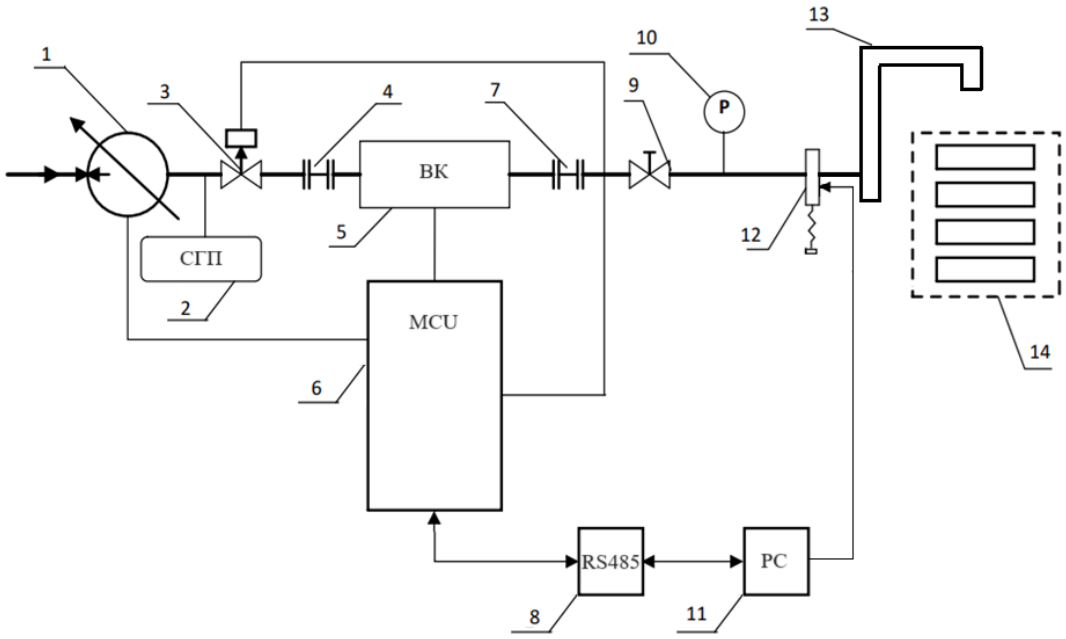


Рис. 4.1. Структурна схема системи автоматизованого наливу для експериментальних досліджень: 1 — насос; 2 — сепаратор газоподібної фракції; 3 - клапан з електроприводом; 4 — адаптер; 5 — витратомір Коріоліса; 6 — мікроконтролер; 7 — адаптер; 8 — інтерфейс зв'язку; 9 – клапан ручний; 10 – датчик тиску; 11 — персональний комп'ютер; 12 — регулююча заслінка; 13 - конструкція наливу; 14- зразкові та допоміжні ЗВТ (мірник зразковий; вага для статичного зважування; ареометри для нафтопродуктів; термометр скляний).

АСН, що була використана для проведення експерименту, була сконструйована на базі існуючої установки, що використовується на нафтобазі м. Вінниця для комерційного обліку НП, що відпускається у бензовози [45]. Експериментальна установка наливу зображена на рис. 4.2.

Рис. 4.2. Експериментальна установка

Важлива складова експерименту — це те, що вимірювальним потоком була не вода, як у лабораторії під час проведення повірки, а НП — бензин та ДП.

Основні фізичні та хімічні властивості бензину та ДП отримані уповноваженою лабораторією та представлені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1

Основні фізичні та хімічні властивості бензину та дизелю

Параметри	Паливо	
	Дизельне	Бензин
Густина при 20°С, кг/м^3	821	742,5
Кінетична в’язкість при 20°С, м^2/с	3,0	0,7
Середній коефіцієнт стиснення при 50МПа і 20°С, 10^9 м^2/Н	0,65	1,17
Початок кипіння, °С	190	35
Октанове число	-	92

Проведено низку вимірювань, щоб оцінити вплив динаміки зміни швидкості потоку через масову витрату.

Для проведення вимірювання був вибраний ВК Endress&Hauser Promass 83F, що зображено на рис 4.3.

Рис. 4.3. Витратомір Коріоліса Endress&Hauser Promass 83F

ВК має дві ВТ. Внутрішній діаметр ВТ становить 40,5 мм. Внутрішній діаметр трубопроводу перед ВК і за ВК становить 80 мм.

Вибрані ВК, напередодні проведення експерименту проходили повірку в лабораторії ДП «Укрметртестстандарт» і у протоколі повірки зазначено, що за 25 т/год похибка становить мінус 0,04 % за допустимої похибки 0,13 %, що використовувався для вимірювання МВ ДП. А у ВК, який використовувався для вимірювання МВ бензину становить мінус 0,02 % за допустимої похибки 0,13 %, що використовувався для вимірювання МВ ДП. Протоколи повірки представлені у Додатку Б.

Зразкове обладнання використовувалось згідно методики повірки, а саме:

- вага для статичного зважування (із платформою для розміщення мірнику): діапазон вимірювання від 0 до 1000кг, ціна поділки 0,1кг, із класом точності ІІ;

- мірник зразковий: об'єм 500 літрів, класом точності 0,1;

- ареометри: діапазони вимірювання 710-770 кг/м^3 та 770-830 кг/м^3 із класом точності 0,1;

- термометр: діапазон вимірювання від 0 до 140°С, із класом точності 0,5.

Використання зразкових ЗВТ під час експериментального дослідження представлено на рис 4.4.

Рис. 4.4. Зразкові ЗВТ, що використовувалось під час експерименту

4.2 Експериментальне дослідження впливу зміни параметрів потоку нафтопродуктів на точність вимірювання витратоміром Коріоліса

Основне завдання — дослідити зміну похибки, в залежності від зміни швидкості потоку, що вимірюється ВК. У першому експерименті необхідної динаміки зміни швидкості, відповідно МВ, досягнуто демонтажем з конструкції трубопроводу регульованого звужувального пристрою, що встановлюється у трубопроводі за ВК [46].

За допомогою чого усі пульсації, що призводять до зміни швидкості потоку після насосу та наявність можливої кавітації у потоці, а також, хаотичність зміни тиску потоку у трубопроводі, будуть хаотичні. Ці технічні операції дали можливість отримати у ВК хаотичну зміну МВ, що становить 7 кг/с ± 2 кг/с з досить швидкою зміною, впродовж декількох секунд.

В табл. 4.2 подані результати вимірювання за хаотично змінної МВ 5…9 кг/с та розраховані похибки вимірювання МВ, ОВ та густини потоку бензину [21].

Таблиця 4.2

Результати перевірки ВК у складі АСН за сталої МВ потоку бензину, 5-9 кг/с

№	Маса виміряна ВК $M_К$, кг	Густина виміряна ВК $\rho_{К,}$ кг/м^3	Об'єм, розрахований ВК $V_К$, л	Маса виміряна еталоном $M_В$, кг	Густина виміряна еталоном $\rho_{а,}$ кг/м^3	Об'єм, виміряний еталоном, $V_М$, л	T, °C
1	371,2	742,5	499,7	373	741,5	503,1	21,3
2	369,2	742,2	497,4	370	741	499,3	21,4
3	372,1	741,0	502,2	371,2	741	500,9	21,5
4	371,5	740,1	502,0	369,5	741	499,0	21,6
5	370,4	742	498,4	372	741	502,2	21,6

За результатами експерименту, похибка за каналом вимірювання маси становить 0,42 % > 0,13 %, за каналом вимірювання об'єму становить 0,58 % > 0,19 %, а за густиною 0,11 %. Цей експеримент підтверджує, що хаотична зміна швидкості потоку значно впливає на точність вимірювання МВ, ОВ та густини бензину вибраним ВК.

Число Рейнольдса за таких умов, з масовою витратою від 5 кг/с до 9 кг/с для потоку бензину знаходиться в межах $153846 < Re < 321429$. Тобто, потік бензину у витратомірних трубках відбувається у турбулентному режимі.

Збіжність результатів вимірювання за каналом вимірювання масової витрати була оцінена через розрахунок середньоквадратичного відхилення та становить 0,31%. За технічною документацією від виробника на ВК збіжність результатів вимірювання без врахування стабільності нульової точки становить 0,05%. Отримані значення під час експерименту 0,31%, поза межами допустимої 0,05%.

На рис 4.5 представлено зміну масової витрати під час вимірювання отриману з даних уніфікованого вихідного сингалу 4-20мА ВК.

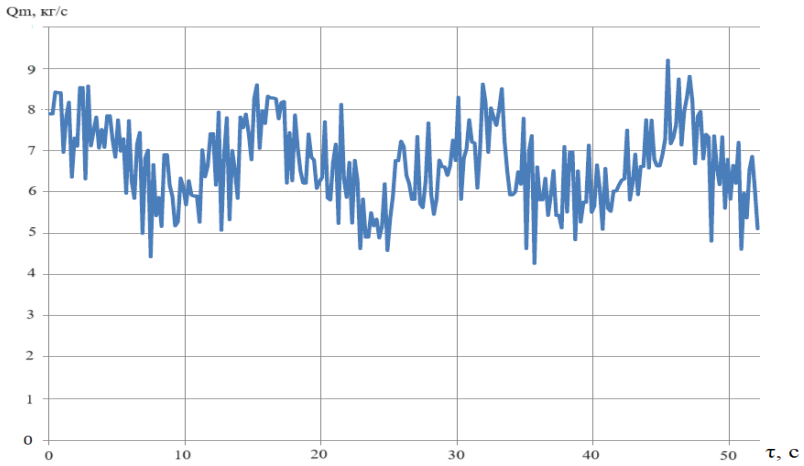


Рис 4.5. Зміна масової витрати бензину під час вимірювання отриману з даних уніфікованого вихідного сингалу 4-20мА витратоміру Коріоліса

Дані, що вказані на графіку рис. 4.5, були отримані під час вимірювання ВК за каналом вимірювання масової витрати з виходу уніфікованого сигналу 4-20мА, що фіксувались за допомогою програмного забезпечення з періодичністю 20 результатів вимірювання за секунду. Отримано 1074 результатів вимірювання. Також, було визначено максимальний індекс пульсації, що становить 0,0838, що задовольняє вимоги проведення експерименту. А мінімальний індекс пульсації становить 0,00025. Діапазон значень тиску рідини у трубопроводі за ВК становить 3,5 бар до 12 бар [47].

Бюджет невизначеності результатів вимірювання та результати оцінювання складових невизначеності виконувались за методом, що представлено у розділі 5.

За результатами оцінювання складових невизначеності отримано розширену невизначеність вимірювання у відносних одиницях, що становить 0,42%. В абсолютних одиницях буде становити 1,548 кг.

Оцінена невизначеність результатів вимірювання (НРВ) характеризує НРВ ВК за каналом вимірювання МВ із використанням зразкового засобу вимірювальної техніки під час перевірки метрологічних характеристик ВК у складі АСН.

Однак, отримані результати не гарантують вимірювання із оціненою невизначеністю вимірювання через низку факторів, які впливають на точність

вимірювання ВК у складі АСН, які були розглянуті у розділі 1. Тому, проведено оцінку невизначеності результатів вимірювання для одноразового вимірювання із врахуванням індексу пульсації. Для аналізу взяті результати вимірювання уніфікованого сигналу з ВК, що представлені у рис.4.5

За результатами оцінювання складових невизначеності отримано розширену невизначеність вимірювання у відносних одиницях, що становить 0,43%. В абсолютних одиницях буде становити 1,591 кг.

Якщо порівняти значення оцінки невизначеності багаторазових вимірювань з використанням зразкового обладнання із оцінкою невизначеності вимірювання із врахуванням складової обумовленою пульсацією потоку, отримаємо різницю, яка становить 2,7%. Це значення є підтвердженням адекватності оцінювання невизначеності з урахуванням складової обумовленої пульсацією потоку.

В табл. 4.3 подані результати вимірювання за хаотично змінної масової витрати 5…9 кг/с та розраховані похибки вимірювання МВ, ОВ та густини потоку ДП [21].

Таблиця 4.3

Результати перевірки точності ВК у складі АСН за сталої МВ потоку ДП, 5-9 кг/с

№	Маса виміряна ВК $M_К$, кг	Густина виміряна ВК $\rho_{К,}$ кг/м^3	Об'єм, розрахований ВК $V_К$, л	Маса виміряна еталоном $M_В$, кг	Густина виміряна еталоном $\rho_{а,}$ кг/м^3	Об'єм, виміряний еталоном, $V_М$, л	T, °C
1	410,8	822,5	499,5	411,6	821,5	500,9	21,4
2	411,4	823,0	499,9	411,9	821,5	501,3	21,4
3	412,1	823,5	500,4	410,9	821,5	500,3	21,5
4	411,0	821,7	500,2	411,5	821,5	501,0	21,5
5	411,5	821,6	500,9	410,6	821,5	499,7	21,6

За результатами експерименту, похибка за каналом вимірювання маси становить 0,15 % > 0,13 %, за каналом вимірювання об'єму становить 0,20 % >

0,19 %, а за густиною 0,12 %. Цей експеримент підтверджує, що хаотична зміна швидкості потоку значно впливає на точність вимірювання МВ, ОВ та густини ДП вибраним ВК.

Число Рейнольдса за таких умов, з масовою витратою від 5 кг/с до 9 кг/с для потоку бензину знаходиться в межах $32258 < Re < 58064$. Тобто, потік ДП у витратомірних трубках відбувається у турбулентному режимі. Однак, число Рейнольдса для ДП, врази менше ніж для бензину.

Збіжність результатів вимірювання за каналом вимірювання МВ була оцінена через розрахунок середньоквадратичного відхилення та становить 0,12%. За технічною документацією від виробника на ВК збіжність результатів вимірювання без врахування стабільності нульової точки становить 0,05%. Отримані значення під час експерименту 0,12%, поза межами допустимої 0,05%.

Дані, що вказані на графіку рис. 4.6, були отримані під час вимірювання ВК за каналом вимірювання МВ з виходу уніфікованого сигналу 4-20мА, що фіксувались за допомогою програмного забезпечення з періодичністю 20 результатів вимірювання за секунду.

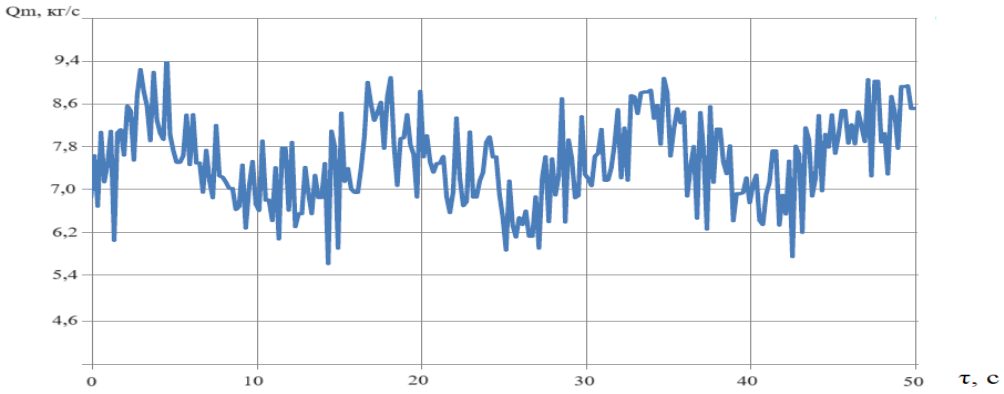


Рис 4.6 Зміна масової витрати дизельного палива під час вимірювання отриману з даних уніфікованого вихідного сингалу 4-20мА витратоміру Коріоліса

Отримано 1012 результатів вимірювання. Також, було визначено максимальний індекс пульсації, що становить 0,0321, що задовольняє вимоги проведення експерименту. А мінімальний індекс пульсації становить 0,00025. Діапазон значень тиску рідини у трубопроводі за ВК становить від 4 бар до 13 бар.

За результатами оцінювання складових невизначеності отримано розширену невизначеність вимірювання у відносних одиницях, що становить 0,20%. В абсолютних одиницях буде становити 0,84 кг.

Оцінена НРВ характеризує НРВ ВК за каналом вимірювання МВ із використанням зразкового засобу вимірювальної техніки під час калібрування ВК у складі АСН. Однак, отримані результати не гарантують вимірювання із оціненою невизначеністю вимірювання через низку факторів, які впливають на точність вимірювання ВК у складі АСН, які були розглянуті у розділі 1.

Тому, проведено оцінку невизначеності результатів вимірювання для одноразового вимірювання із врахуванням індексу пульсації. Для аналізу взяті результати вимірювання уніфікованого сигналу з ВК, що представлені у рис.4.6.

За результатами оцінювання складових невизначеності отримано розширену невизначеність вимірювання у відносних одиницях, що становить 0,218%. В абсолютних одиницях буде становити 0,897 кг.

Похибка оцінювання невизначеності вимірювання становить 6,7%.

Якщо порівняти значення оцінки невизначеності багаторазових вимірювань з використанням еталонного обладнання із оцінкою невизначеності вимірювання із врахуванням складової обумовленою пульсацією потоку, отримаємо різницю, яка становить 6,7%. Це значення є підтвердженням адекватності оцінювання невизначеності з урахуванням складової обумовленої пульсацією потоку для ДП.

4.3 Експериментальне дослідження із застосуванням удосконаленої інформаційно-вимірювальної системи витратоміру Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу

Основне завдання — дослідити зміну похибки, в залежності від динаміки зміни швидкості потоку, що вимірюється ВК. Усі пульсації, що виникають під час зміни швидкості потоку після насосу та наявність можливої кавітації у потоці, недостатність тиску у системі, будуть контрольовані. Використання регулюючої заслінки, дало можливість отримати у ВК сталу МВ, що становить 7 кг/с ± 0,04 кг/с з повільною зміною, впродовж декількох секунд.

В табл. 4.4 подані результати перевірки точності ВК у складі АСН за сталої МВ 7 кг/с ± 0,04 кг/с та розраховані похибки вимірювання маси, об'єму та густини бензину.

Таблиця 4.4

Результати перевірки ВК у складі АСН за сталої МВ потоку бензину, 7 кг/с

№	Маса виміряна ВК $M_К$, кг	Густина виміряна ВК $\rho_{К,}$ кг/м^3	Об'єм, розрахований ВК $V_К$, л	Маса виміряна еталоном $M_В$, кг	Густина виміряна еталоном $\rho_{а,}$ кг/м^3	Об'єм, виміряний еталоном, $V_М$, л	*T*, °*C*
1	369,9	740,8	499,3	369,9	741	499,1	21,3
2	369,9	740,8	499,3	370	741	499,2	21,3
3	370,3	741,2	499,5	370,2	741	499,7	21,5
4	370,2	741,1	499,5	370,1	741	499,6	21,5
5	370,1	741,1	499,4	370,0	741	499,6	21,5

За результатами експерименту, похибка за каналом вимірювання маси становить 0,02 % < 0,13 %, за каналом вимірювання об'єму становить 0,03 % < 0,19 %, а за густиною 0,02 %. Цей експеримент підтверджує ефективність використання регулюючої заслінки для досягнення найоптимальнішого значення індексу пульсації, при якому точність вимірювання МВ, ОВ та густини бензину вибраним ВК відповідатиме його класу точності.

Число Рейнольдса за таких умов, з масовою витратою 7 кг/с для потоку бензину становить Re= 215384. Тобто, потік бензину у витратомірних трубках відбувається у турбулентному режимі.

Збіжність результатів вимірювання за каналом вимірювання МВ була оцінена через розрахунок середньоквадратичного відхилення та становить 0,029%. За технічною документацією від виробника на ВК збіжність результатів вимірювання без врахування стабільності нульової точки становить 0,05%. Отримані значення під час експерименту 0,029% в межах допустимої 0,05%. У наступних експериментах критерій збіжності буде становити 0,05%.

На рис 4.7 представлено зміну МВ під час вимірювання отриману з даних уніфікованого вихідного сингалу 4-20мА витратоміру Коріолса.

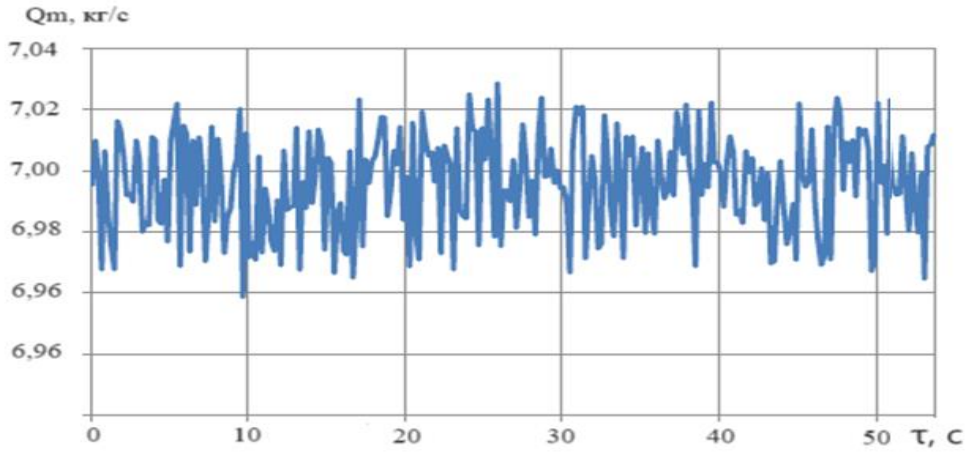


Рис 4.7 Зміна масової витрати бензину під час вимірювання отриману з даних уніфікованого вихідного сингалу 4-20мА витратоміру Коріоліса

Дані, що вказані на графіку рис. 4.7, були отримані під час вимірювання ВК за каналом вимірювання МВ з виходу уніфікованого сигналу 4-20мА, що фіксувались за допомогою програмного забезпечення з періодичністю 20 результатів вимірювання за секунду. Експеримент одного наливу за стабільної швидкості становить близько 53 секунд, без врахування час виходу на масову витрату у 7 кг/с, що становить близько 2 секунд. Отримуємо близько 1057 результатів вимірювання. Також, було визначено максимальний індекс пульсації, що становить 0,00075, що задовольняє вимоги проведення експерименту. А мінімальний індекс пульсації становить 0,0001, що залежить від розрядності вихідного уніфікованого сингалу. У ВК який використовується у експерименті, розрядність уніфікованого виходу становить 0,5мкА. Тобто, зміна МВ на 0,5мкА, при максимальність масовій витраті 50 кг/с, становить 0,0016 кг/с.

Діапазон значення тиску рідини у трубопроводі за ВК становить від 7,1 до 7,3 бар [47].

За результатами оцінювання складових невизначеності отримано розширену невизначеність вимірювання у відносних одиницях, що становить 0,027%. В абсолютних одиницях буде становити 0,098 кг.

Оцінена НРВ характеризує НРВ ВК за каналом вимірювання МВ із використанням зразкового засобу вимірювальної техніки під час перевірки точності вимірювання ВК у складі АСН.

Однак, отримані результати не гарантують вимірювання із оціненою невизначеністю вимірювання через низку факторів, які впливають на точність вимірювання ВК у складі АСН, які були розглянуті у розділі 1.

Тому, проведено оцінку невизначеності результатів вимірювання для одноразового вимірювання із врахуванням індексу пульсації. Для аналізу взяті результати вимірювання уніфікованого сигналу з ВК, що представлені у рис.4.7.

За результатами оцінювання складових невизначеності отримано розширену невизначеність вимірювання у відносних одиницях, що становить 0,0288%. В абсолютних одиницях буде становити 0,107 кг.

Розширена невизначеність вимірювання складає менше третини від допустимої похибки за каналом вимірювання МВ ВК, що зазначено у технічні документації на ВК, що становить 0,1%.

В табл. 4.5 подані результати перевірки точності ВК у складі АСН за сталої МВ 7 кг/с ± 0,04 кг/с та розраховані похибки вимірювання маси, об’єму та густини ДП.

Таблиця 4.5

Результати перевірки ВК у складі АСН за сталої МВ потоку ДП, 7кг/с

№	Маса виміряна ВК $M_К$, кг	Густина виміряна ВК $\rho_{К,}$ кг/м^3	Об’єм, розрахований ВК $V_К$, л	Маса виміряна еталоном $M_В$, кг	Густина виміряна еталоном $\rho_{а,}$ кг/м^3	Об’єм, виміряний еталоном, $V_М$, л	T, °C
1	411,4	822,1	500,3	411,2	822	500,1	21,1
2	411,2	822,2	500,1	411,1	822	500,0	21,1
3	411,0	821,9	500,0	410,9	822	499,8	21,3
4	411,0	821,9	500,0	410,9	822	499,8	21,3
5	411,0	821,8	500,1	410,9	822	499,8	21,3

За результатами експерименту, похибка вимірювання за каналом вимірювання МВ становить 0,02 % < 0,13 %, за каналом вимірювання ОВ становить 0,04 % < 0,19 %, а за густиною 0,02 %. Цей експеримент підтверджує, використання регулюючої заслінки, приводить хаотичну зміну швидкості потоку до стабільної та контрольованої через розрахунок індексу пульсації. Що дозволило зменшити похибку вимірювання МВ, ОВ та густини ДП вибраним ВК.

Число Рейнольдса за таких умов, з масовою витратою 7 кг/с для потоку дизелю становить Re= 46667. Потік дизелю у витратомірних трубках відбувається у турбулентному режимі.

Збіжність результатів вимірювання за каналом вимірювання МВ була оцінена через розрахунок середньоквадратичного відхилення та становить 0,034%.

Дані, що вказані на графіку рис. 4.8, були отримані під час вимірювання ВК за каналом вимірювання МВ з виходу уніфікованого сигналу 4-20мА, що фіксувались за допомогою програмного забезпечення з періодичністю 20 результатів вимірювання за секунду.

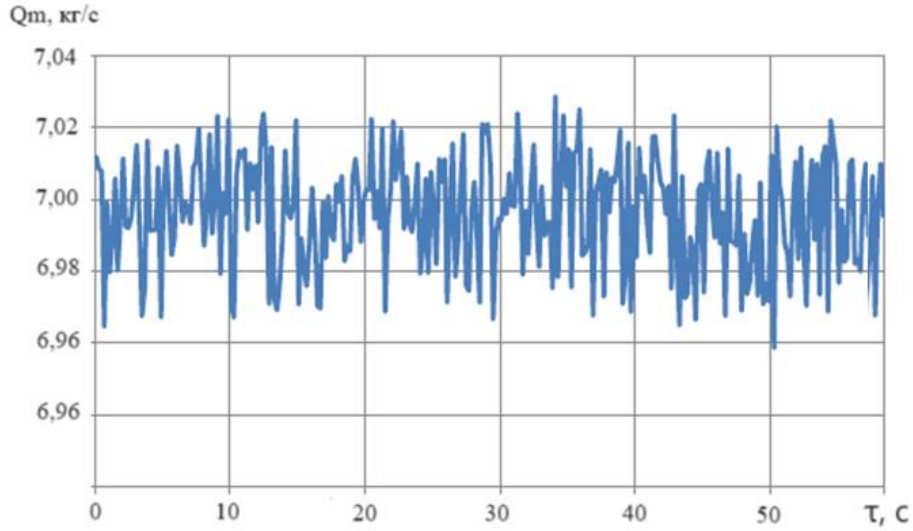


Рис 4.8 Зміна масової витрати дизелю під час вимірювання отриману з даних уніфікованого вихідного сингалу 4-20мА витратоміру Коріоліса

Експеримент одного наливу за стабільної швидкості становить близько 59 секунд, без врахування час виходу на масову витрату у 7 кг/с, що становить близько 2 секунд. Отримуємо близько 1174 результатів вимірювання. Для розрахунку

індексу пульсації було використано формулу 2.42. Також, було визначено максимальний індекс пульсації, що становить 0,00088, що задовольняє вимоги проведення експерименту (не більше 0,001). А мінімальний індекс пульсації становить 0,0001, що залежить від розрядності вихідного уніфікованого сингалу. У ВК який використовується у експерименті, розрядність уніфікованого виходу становить 0,5мкА. Тобто, зміна МВ на 0,5мкА, при максимальність масовій витраті 50 кг/с, становить 0,0016 кг/с.

Діапазон значень тиску рідини у трубопроводі за ВК становить від 7,85 бар до 8,15 бар [47].

Для оцінювання результатів вимірювання МВ ДП ВК необхідно сформувати бюджет невизначеності із врахуванням складових невизначеності, що описані в розділі 5.

За результатами оцінювання складових невизначеності отримано розширену невизначеність вимірювання у відносних одиницях, що становить 0,0237%. В абсолютних одиницях буде становити 0,097 кг.

Оцінена НРВ характеризує НРВ ВК за каналом вимірювання МВ із використанням зразкового засобу вимірювальної техніки під час калібрування ВК у складі АСН.

Однак, отримані результати не гарантують вимірювання із оціненою невизначеністю вимірювання через низку факторів, які впливають на точність вимірювання ВК у складі АСН, які були розглянуті у розділі 1.

Тому, проведено оцінку невизначеності результатів вимірювання для одноразового вимірювання із врахуванням індексу пульсації. Для аналізу взяті результати вимірювання уніфікованого сигналу з ВК, що представлені у рис.4.8

За результатами оцінювання складових невизначеності отримано розширену невизначеність вимірювання у відносних одиницях, що становить 0,02371%. В абсолютних одиницях буде становити 0,098 кг

Невизначеність вимірювання із врахуванням індексу пульсації, збільшується на 1%, як для експерименту із потоку бензину, так із потоком ДП.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Для перевірки теоретичних розрахунків було проведено експериментальне дослідження із врахуванням факторів, що впливають на точність вимірювання ВК, а саме, зміна швидкості потоку НП під час вимірювання, що супроводжується зміною тиску в вимірювальних трубках ВК і відповідно зміною МВ.

Було розроблено структурну схему установки. Продемонстровано фото експериментальної установки. Створено план експериментального дослідження та виконано усі задачі.

Виконано серію вимірювань із контролем зміни індексу пульсації.

Виконано вимірювання МВ, ОВ, густини та температури потоку ВК у складі АСН при індексі пульсації значення якого не перевищує 0,1. Оцінено систематичну похибку за каналом вимірювання МВ, ОВ, густини та температури. Оцінено невизначеність результатів вимірювань.

Виконано вимірювання МВ ВК у складі АСН при індексі пульсації значення якого не перевищує 0,001. Оцінено систематичну похибку за каналом вимірювання МВ, ОВ, густини та температури. Оцінено невизначеність результатів вимірювань.

Виконано порівняння результатів вимірювання із застосуванням удосконаленої ІВС ВК та без неї. Похибка вимірювання зменшилась втричі для вимірювання МВ потоку бензину та вдвічі для вимірювання МВ потоку ДП. Це є підтвердження ефективності удосконаленої ІВС ВК.

Виконано порівняння оцінок невизначеності результатів вимірювання при застосуванні зразкових засобів вимірювання із оцінкою невизначеності вимірювання з врахуванням складової невизначеності вимірювання обумовленою індексом пульсації. Отримано різницю, яка становить 2,7% для потоку бензину та отримано різницю, яка становить 6,7% для потоку ДП. Це є підтвердженням адекватності оцінювання невизначеності з урахуванням складової обумовленої пульсацією потоку.

РОЗДІЛ 5
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПОВІРКИ ВИТРАТОМІРУ КОРІОЛІСА У СКЛАДІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ НАЛИВУ. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ДИНАМІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ВИТРАТОМІРУ КОРІОЛІСА

5.1 Розробка та оцінювання критерію індексу пульсації потоку

За результатами досліджень отримано теоретичні та емпіричні докази впливу зміни під час вимірювання параметрів потоку НП, таких як: зміна швидкість потоку і відповідно зміни МВ; зміна тиску і відповідно поява пульсації, а також наявності двофазного потоку (рідина і газ).

Контроль неінформативних параметрів потоку здійснюється методами [2], зокрема:

- для вимірювання швидкості потоку, використовуються різноманітні вимірювальні прилади, такі як витратоміри, анемометри, допплерівські датчики, які дозволяють визначити швидкість руху рідини у трубопроводі;
- контроль зміни тиску, вимірювання тиску у різних точках трубопроводу дозволяє контролювати зміни тиску в результаті зміни швидкості потоку;
- метод вимірювання МВ, яка безпосередньо залежить від зміни швидкості потоку;
- вимірювальний контроль температури НП, яка впливає на її в'язкість та інші параметри, які впливають на МВ;
- використання автоматизованих систем контролю потоку, що можуть включати в себе сенсори, контролери та програмне забезпечення для автоматичного вимірювання та аналізу параметрів потоку з метою реагування на будь-які зміни.

Ці методи можуть застосовуватися окремо або у поєднанні для забезпечення ефективного контролю параметрів потоку зі зміною швидкості.

Запропоновано метод контролю зміни швидкості потоку під час вимірювання. Метод полягає у визначені різниці зміни МВ з урахуванням роздільної здатності ВВП, між двома послідовними результатами вимірювання та визначенням різниці між вимірюваними значеннями. Через те, що основним параметром МВ ВВП ВК є зсув фази, через зміну швидкості та інерційність вимірювального перетворювача є вірогідність отримання вимірюваних значень, які не враховують досить швидку зміну вхідного сигналу. Врахувавши ці особливості, можна оцінити індекс пульсації ВК, що обумовлений наявністю пульсації потоку за формулою:

$$I_P = \frac{(Q_m)_{max} - (Q_m)_{min}}{2 \cdot (Q_m)_{av}} \quad (5.1)$$

де I_p – індекс пульсації;

$(Q_m)_{max}$ – максимальна МВ в пульсуючому потоці, [кг/с];

$(Q_m)_{min}$ – мінімальна МВ в пульсуючому потоці, [кг/с];

$(Q_m)_{av}$ – середнє значення МВ в пульсуючому потоці.

Розрахувати середній імпульс пульсацій для усіх виміряних значень, можна за формулою (5.2):

$$I_{p.av} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} I_{pi}}{N}\right) \quad (5.2)$$

де $I_{p.av}$ – середнє значення індексу пульсації;

N – кількість вимірювань.

Врахувавши технічні характеристики ПВП та ВВП, можна оцінити похибку вимірювання обумовлену пульсацією потоку витратоміром Коріоліса за формулою:

$$\Delta_I = \left(\sum_{i=1}^{N} x_{i+1} \cdot I_{pi}\right)\left({}^{f_I}/_{f_K}\right) \quad (5.3)$$

де Δ_I – похибка, обумовлена пульсацією потоку, [кг/с];

x_{i+1} – точкова МВ в певний момент, [кг/с];

I_{pi} - індекс пульсації для x_i та x_{i+1};

f_I – частота зчитування показів з уніфікованого сигналу, [Гц];

f_K – частота зчитування показів з сенсорів витратомірних трубок, [Гц].

Розрахувавши критерій допустимого значення індексу пульсації, можна контролювати зміну швидкості потоку під час вимірювання за рахунок значень індексу пульсацій.

Для визначення двофазного потоку в трубопроводі використовуються способи:

- вимірювання ОВ. Використовується для визначення відсоткового співвідношення ОВ кожної фази у потоці. Цей спосіб може включати вимірювання витрати кожної фази або використання датчиків об'ємного потоку;
- вимірювання МВ потоку. Цей спосіб полягає у вимірюванні МВ потоку кожної фази в потоці за допомогою інерційних вимірювачів. Після цього визначають відсоткове співвідношення масового потоку для кожної фази. Однак, цей спосіб потребує спеціальної обробки результатів вимірювання для розпізнавання МВ кожної фази, що збільшує імовірність отримання результатів вимірювання із більшою невизначеністю [34];
- акустичні методи. Включають в себе вимірювання акустичних характеристик потоку, таких як швидкість звуку та частотні характеристики різних фаз. Ці дані використовуються для визначення відсоткового співвідношення фаз у потоці;
- методи оптичного вимірювання. Вимірювання проводиться за допомогою оптичних сенсорів, які виявляють різницю між оптичними властивостями рідин і газів.

Запропоновано спосіб контролю двофазного потоку рідини, густина якої заздалегідь відома, за результатами вимірювання густини ВК.

Оцінка наявності двофазного потоку можна здійснити за допомогою заздалегідь відомої густини потоку. Наприклад, густина бензину при 20°С складає $\rho_З$. А густина виміряна вимірювальним каналом ВК буде $\rho_В$. Різниця між значенням:

$$\Delta\rho = |\rho_з - \rho_в|, \quad (5.4)$$

де $\Delta\rho$ – різниця між значеннями густини продукту;

$\rho_з$ - значення густини продукту, виміряне перед вимірюванням, приведене до 20 °С;

$\rho_в$ - миттєве значення густини продукту, отримане з ІВК густини ВК, приведене до 20 °С.

Способи контролю зміни тиску в трубопроводі, наступні:

- спосіб із застосуванням манометрів;

- метод із застосуванням СТ. Електронні датчики тиску встановлюються в трубопроводі для постійного вимірювання тиску і передачі цих даних на відповідне обладнання для моніторингу та аналізу.

- ультразвукові методи. Ультразвукові датчики використовуються для вимірювання зміни тиску в трубопроводі за допомогою відбивання звукових хвиль від стінок труби.

- метод із застосуванням мембранних та п’єзоелектричних датчиків. Ці типи датчиків використовуються для вимірювання зміни тиску в трубопроводі через зміну форми або електричної напруги, що виникає від деформації мембрани або п’єзоелектричного кристалу при навантаженні.

Запропоновано спосіб контролю зміни тиску у трубопроводі та у витратомірі Коріоліса через середньоквадратичну амплітуду зміни тиску.

Зміна швидкості потоку рідини під час вимірювання, безпосередньо вливає на зміна МВ, що характеризується зміною тиску у трубопроводі. Тому, необхідно контролювати значення зміни тиску під час вимірювання. Формула для розрахунку середньоквадратичної амплітуди зміни тиску через пульсації можна розраховується за формулою (5.5).

$$\Delta P_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[P(\tau)_i - P_{av}]^2}{n}}, \quad (5.5)$$

де ΔP_S - середньоквадратична амплітуда зміни тиску, [кПа];

$P(\tau)_I$ – тиск у певний момент часу, [кПа];

P_{av} – середнє значення тиску протягом усього часу вимірювання, [кПа].

5.2 Удосконалення методики повірки витратоміру Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу

Дана методика повірки встановлює вимоги до процедури визначення придатності ВК у складі АСН, основні етапи, зразкові засоби повірки, умови проведення, а також методи обробки результатів вимірювань. Описані вимоги до перевірки ВК у складі АСН, які застосовуються для вимірювання МВ та/або ОВ і густини потоку рідини в діапазоні вимірювань МВ від 1000 кг/год до 180000 кг/год. Передбачено виконання перевірки із отриманням вимірювального сигналу з ВК через вбудований дисплей, імпульсний вихід, уніфікований сигнал токового виходу, а також із використанням вторинного перетворювача із відображенням виміряних значень. Описано метод оцінювання основних метрологічних характеристик ВК у складі АСН. Містить оцінювання неінформативних параметрів потоку, вимірювання яких виконується додатковими ЗВТ у складі АСН. Методика повірки розроблена згідно вимог [48], а також, згідно міжнародної рекомендації OIML R, які є типовими нормативними актами, що встановлюють метрологічні характеристики, необхідні для певних засобів вимірювальної техніки і які визначають методи та обладнання для їх перевірки [49] – [51].

В розроблена методика містить основні терміни, визначення та скорочення, які використовуються під час виконання процесу.

Операції та зразкові ЗВТ визначені наступні. Для контролю умов довкілля під час проведення повірки необхідно використовувати «Систему для вимірювання параметрів навколишнього середовища із наступними метрологічними характеристиками:

- діапазон вимірювання температури від мінус 20 °С до плюс 60 °С, допустима похибка ± 0,5 °С;
- діапазон вимірювання вологості від 0 до 95 %, допустима похибка ±3%;
- діапазон вимірювання атмосферного тиску від 90 до 110кПа, допустима похибка ±1%.

Для виконання повірки використовуються зразкові ЗВТ із визначеними метрологічними характеристиками. В залежності від МВ необхідно використовувати певний набір зразкових ЗВТ, а саме:

- вага для статичного зважування(із платформою для розміщення мірнику): діапазон вимірювання від 0 до 1000кг, ціна поділки 0,1кг, із класом точності II-III;

- мірник зразковий: об'єм 500 літрів, ціна поділки 0,5л, класом точності 0,1;

- ареометри: діапазони вимірювання 650-710 кг/м^3; 710-770 кг/м^3; 770-830 кг/м^3; 830-890 кг/м^3, із класом точності 0,1;

- термометр: діапазон вимірювання від -30 до 50°С, із класом точності 0,5; 1.

Для обробки результатів вимірювання необхідно використовувати персональний комп’ютер.

Обов’язковим розділом до методики повірки є вимоги до кваліфікації персоналу, а також, вимоги до безпеки під час виконання повірки.

Наступним розділом методики повірки є розділ в якому визначаються умови навколишнього середовища під час проведення калібрування, а саме:

- температура довкілля від 15 °С до 25 °С;
- відносна вологість від 30% до 70 %;
- атмосферний тиск від 95 до 105 кПа.

Повірка може проводитись як за додержанням встановлених умов довкілля, так і в разі виходу даних умов за межі встановленого діапазону, але за умови аналізу їхнього впливу на результати вимірювань під час повірки та врахування температурних коефіцієнтів розширення та додержанням вимог до умов експлуатації зразкових ЗВТ.

Перед виконанням повірки необхідно виконати підготовку. Необхідно виконати поетапну дії підготовки зразкових ЗВТ, допоміжного обладнання, ВК у складі АСН, що підлягає повірці, протоколу проведення повірки, зазначити назву, виробника, тип, серійні номери обладнання, що буде використовуватись під час повірки. Виконати вимоги згідно технічної документації, наприклад, після ввімкнення живлення, забезпечити час виходу у робочий режим засобів вимірювання та обладнання, що бере участь у повірці, згідно з експлуатаційною

документацією. Перед початком повірки персоналу, що виконує роботи, зафіксувати умови навколишнього середовища.

Виконується послідовність дій з зовнішнього огляду та перевірки працездатності. АСН у складі якої є ВК має відповідати усім вимогам стандарту [49] – [51].

Виконується перевірка герметичності, перевірка працездатності манометру, що встановлено після ВК. Виконується перевірка функціонування АСН та ВК у складі АСН.

Після виконання підготовки, виконується повірка ВК у складі АСН, за наступним алгоритмом дій.

Повірка ВК у складі АСН здійснюється безпосереднім звіренням його показів виміряної маси рідини з дійсними значеннями, виміряним за допомогою зразкових ваг для статичного зважування шляхом розміщення на ваги мірнику, в який буде здійснюватися налив контрольної дози. Через те, що використовується для виконання повірки зразковий мірник місткістю 500л, у програмі на персональному комп’ютері задається доза наливу рівно 500л.

Повірка ВК у складі АСН проводитись за місцем експлуатації ВК за умови дотримання вимог даної методики. Середовище потоку є нафтопродукт: бензин або ДП.

Експериментальні вимірювання маси, об'єму, густини та температури нафтопродукту ВК проводяться в наступному порядку:

1) Спочатку незаповнений мірник розміщують на вагах для проведення процедури тарування. Виконати тарування ваги із розміщеним на них незаповненим мірником. Після цього мірник наповнюється рідиною потоку, МВ та густина якого була виміряна ВК;

2) За допомогою АСН оператор встановлює необхідний об’єм рідини в 500 літрів, що буде вимірюватись ВК, доки значення на суматорі ВК не буде відповідати рівному значенню 500л. Проводиться наповнення мірника з використанням обладнання, що входить у склад АСН. Величини витрати та

відпущеної дози рідини контролюються за показами витратоміру або через спеціалізоване програмне забезпечення;

3) Після закінчення наливу, значення вимірюваної маси, об'єму, густини та температури НП фіксуються з дисплею ВК або через спеціалізоване програмне забезпечення;

4) Фактичний відпущений об'єм, визначають за шкалою мірнику, результат фіксується;

5) Наповнений мірник переміщають до підготовленої до роботи ваги, проводять зважування визначивши масу рідини, що знаходиться у мірнику. Результат фіксується;

6) Після зважування переносним пробовідбірником беруть пробу рідини не вище 1/3 частини висоти мірника. За допомогою пробовідбірника та зразкового ареометра одразу визначають густину НП протягом. Результат фіксується;

7) За допомогою пробовідбірника та зразкового термометра одразу визначають температуру рідини у нижній та середній частині мірника протягом. Результати фіксується. Якщо використовується електронний термометр із окремим щупом на якому розміщено чутливий елемент термометру та наявності кабелю довжиною не менше 2 метрів, від чутливого елемента до вторинного перетворювача, допускається не використовувати пробовідбірник для вимірювання температури;

8) Зберегти результати уніфікованого сигналу 4-20мА з виходу ВК із найменшим періодом передачі даних (у сучасних витратомірах, період становить близько 0,05с) у програмі, для подальшої обробки даних на персональному комп'ютері.

9) Зберегти результати уніфікованого сигналу 4-20мА з виходу СТ із найменшим періодом передачі даних (період становить близько 0,05с) у програмі, для подальшої обробки даних на персональному комп'ютері.

10) Виконати 3 повторні вимірювання одного ВК у складі АСН.

Порядок оцінювання систематичної похибки результатів вимірювання описано нижче [7].

Порядок обробки результатів набору статистичних даних для оцінки похибок ВК каналу вимірювання маси. Порівнюючи значення маси, одержані оператором наливу на з ВК або програмного забезпечення на персональному комп'ютері, з результатами, одержаними при зважуванні наповненого мірника на вагах, розраховують абсолютну і відносну похибку ВК маси кожного наливного стояка. Масу рідини, налиту в мірник обчислюють за формулою:

$$\mathrm{M}_З = M_B + M_П, \tag{5.6}$$

де $M_З$ – маса із врахуванням витиснутого повітря, [кг];

M_B – маса заповненого мірника, [кг];

$M_П$ – маса повітря, яка була витиснута з мірника під час наливу (поправка, обумовлена зважуванням у повітрі), [кг];

$$M_П = V \cdot \rho_П, \tag{5.7}$$

де V – об'єм мірника, [м^3];

$\rho_П$ –густина повітря ($\rho_П$=1,23 кг/м^3).

Абсолютну похибку ВК маси визначають за формулою:

$$\Delta M = M_{PS} - M_З, \tag{5.8}$$

де ΔM – абсолютна похибка каналу вимірювання маси, [кг];

$M_З$ – маса рідини, виміряна вагами, [кг];

M_{PS} - маса рідини, зчитана з монітора комп'ютера, [кг].

Відносну похибку ВК маси визначають за формулою:

$$\delta_M = (\Delta M / M_З) * 100\%, \tag{5.9}$$

де, δ_M – відносна похибка ВК каналу вимірювання маси, %;

ΔM – абсолютна похибка ВК маси, кг;

$M_З$ – маса НП, виміряна зразковими вагами, кг.

Порядок обробки результатів набору статистичних даних для оцінки похибки ВК, каналу вимірювання об'єму. Оскільки калібрування мірника проводилося при 20°С, то приводять значення об'єму V_B до об'єму, що враховує коефіцієнт лінійного розширення матеріалу мірника α, за формулою:

$$V_{\text{Впр}} = V_{\text{В}} \left[1 - 3\alpha * \left(20 - T_{B_{\text{ср}}}\right)\right], \tag{5.10}$$

де $V_{Bпр}$ - об'єм рідини, виміряний зразковим мірником з урахуванням коефіцієнта лінійного розширення матеріалу мірника, [л];

V_B – об’єм рідини, виміряний зразковим мірником, [л];

α- коефіцієнта лінійного розширення матеріалу мірника;

$T_{Bср}$ - середня температура НП у мірнику, [°С].

Середня температура НП у мірнику обчислюється за формулою:

$$T_{\text{Вср}} = \frac{(3 \cdot \text{Т}_{\text{н}} + T_{\text{с}(1,2)})}{4}, \quad (5.11)$$

де $T_{c(1,2)i}$ - середня температура НП в мірнику, виміряна термометром у середній частині мірника, [°С];

$$T_{\text{с}(1,2)i} = \frac{(\text{Т}_{\text{с1}} + T_{\text{с2}})}{2}, \quad (5.12)$$

де T_{c1}- температура, виміряна термометром в середній частині мірника (перша проба), [°С];

T_{c2} - температура, виміряна термометром в середній частині мірника (друга проба), [°С];

$T_н$ - температура, виміряна термометром в нижній частині мірника, [°С].

Значення об‘єму V_{PS}, отриманого з ІВК об’єму ВК, приводять до об‘єму, при середній температурі мірника $\text{Т}_З$:

$$V_{PS\text{пр}} = V_{PS} * \left[1 - \beta\left(\text{Т}_{PS} - T_{\text{Вср}}\right)\right], \quad (5.13)$$

де, $V_{PSпр}$ – об‘єм, визначений за показами отриманих через програмне забезпечення персонального комп'ютера і приведений до об‘єму при $T_З$, [л];

V_{PS} –об‘єм, одержаний по монітору комп'ютера, [л];

β – коефіцієнт об'ємного розширення, 1/°С;

T_{PS} – температура випробовуваного продукту, визначена за показами монітора комп'ютера, [°С].

Абсолютну похибку ВК каналу вимірювання об’єму визначають за формулою:

$$\Delta V = V_{PS\text{пр}} - V_{B\text{пр}}, \quad (5.14)$$

де ΔV – абсолютна похибка каналу вимірювання об’єму, [кг].

Після чого визначається відносну похибка ВК каналу вимірювання об’єму за формулою:

$$\delta_V = \frac{(V_{PS\text{пр}} - V_{B\text{пр}}) * 100\%}{V_{B\text{пр}}}, \quad (5.15)$$

де δ_V – відносна похибка ВК каналу вимірювання об’єму, [л].

Порядок обробки результатів вимірювання для оцінки характеристик похибки ВК каналу вимірювання температури.

Для кожної пари значень T_{PS} і T_{Bcp} проводять розрахунок похибки ВК каналу вимірювання температури, за формулою:

$$\Delta T_{\text{абс}} = \text{Т}_{\text{моні}} - \text{Т}_{\text{мер.сpі}}. \quad (5.16)$$

Порядок обробки результатів вимірювання для оцінки характеристик похибки ВК каналу вимірювання густини.

Для кожної пари значень ρ_{PSnp} і ρ_{Bnp} проводять розрахунок абсолютної похибки ВК густини за формулою:

$$\Delta\rho = \rho_{PSnp} - \rho_{Bnp}, \quad (5.17)$$

де $\Delta\rho$ - абсолютна похибка $\rho_{PSnp.}$ – середнє значення густини продукту, отримане з ІВК густини ВК, приведене до 20 °С;

$\rho_{Bnp.}$ - значення густини продукту, виміряне в нижній частині мірника, приведене до 20 °С.

Контроль неінформативних параметрів потоку автоматизованою системою наливу.

Нижче описані методи контролю параметрів потоку, таких як: зміна тиску, індекс пульсації, наявність двофазного потоку.

Результати, отримані у значеннях сили постійного струму (напруги), перерахувати в значення МВ, в кг/с, за формулою (5.18):

$$Q_m = Q_{m\text{Н}} + \frac{(Q_{m\text{В}} - Q_{m\text{Н}}) \cdot (I_{\text{вим},j} - I_{\text{Н}})}{(I_{\text{В}} - I_{\text{Н}})} \quad (5.18)$$

де $I_{\text{в}}$ – верхнє граничні значення сили постійного струму, [мА];

$I_{\text{н}}$ – нижнє граничні значення сили постійного струму, [мА];

$I_{вим,j}$ – виміряне значення сили постійного струму, [мА];

$Q_{\text{mВ}}$ – верхня границя вимірювань витрати, [кг/с];

Q_{mH} – нижня границя вимірювань витрати, [кг/с].

Визначення індексу пульсації, що характеризую середнє значення пульсації протягом усього часу вимірювання визначеної дози наливу. Метод полягаю у визначені різниці зміни МВ з урахуванням роздільної здатності вимірювального перетворювача, між двома послідовними результатами вимірювання та визначенням різниці між вимірюваними значеннями. Через те, що основним параметром МВ вимірювального перетворювача ВК є зсув фази, через зміну швидкості та інерційність вимірювального перетворювача є вірогідність отримання виміряних значень, які не враховують досить швидку зміну вхідного сигналу. Врахувавши ці особливості, можна оцінити похибку вимірювання витратоміром Коріоліса обумовленою наявністю пульсації потоку за формулою:

$$I_P = \frac{(Q_m)_{max} - (Q_m)_{min}}{2 \cdot (Q_m)_{av}} \tag{5.19}$$

де, I_p – індекс пульсації;

$(Q_m)_{max}$ – максимальна МВ в пульсуючому потоці;

$(Q_m)_{min}$ – мінімальна МВ в пульсуючому потоці;

$(Q_m)_{av}$ – середнє значення МВ в пульсуючому потоці.

Розрахувати середнє арифметичне імпульсу пульсацій для усіх виміряних значень, можна за формулою (5.20):

$$I_{p.av} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} I_{pi}}{N}\right) \tag{5.20}$$

де, $I_{p.av}$ – середнє значення індексу пульсації;

N – кількість вимірювань.

Врахувавши технічні характеристики ПВП та ВВП, можна оцінити похибку вимірювання обумовлену пульсацією потоку ВК за формулою:

$$\Delta_I = \left(\sum_{i=1}^{N} x_{i+1} \cdot I_{pi}\right)\left({}^{f_I}/_{f_K}\right) \tag{5.21}$$

де Δ_I – похибка, обумовлена пульсацією потоку, [кг/с];

x_{i+1} – точкова МВ в певний момент, [кг/с];

I_{pi} - індекс пульсації для x_i та x_{i+1};

f_I – частота зчитування показів з уніфікованого сигналу, [Гц];

f_K – частота зчитування показів з сенсорів витратомірних трубок, [Гц].

Якщо, середнє арифметичне індексу пульсації потоку знаходиться в межах I_{pi}<0,001, вважати, що вимірювання відбувались в нормованих значеннях неінформативних параметрів. Якщо, I_{pi}>0,001 вважати, що вимірювання відбувались із впливом неінформативних параметрів, що вимагає налаштування АСН.

Зафіксувати результат у протоколі повірки.

Додатковим показником для визначення метрологічних характеристик ВК є збіжність результатів вимірювання. Для оцінювання збіжності провести наступні розрахунки.

Розрахувати середнє $\overline{x_i}$ та стандартне відхилення $S_i(x)$ за формулами:

$$\overline{x_i} = \frac{\sum_{j=1}^{m} x_i}{m}, \tag{5.22}$$

де m - кількість результатів.

У відповідності з [52] середні значення $\overline{x_i}$ для базових елементів фіксувати з точністю, на одну значущу цифру більше, ніж результати вимірювань x_i.

$$S_i(x) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(x_{ij}-\overline{x_i})^2}{m-1}}. \tag{5.23}$$

Під час розрахунку стандартних відхилень $S_i(x)$ зберігати достатню кількість значущих цифр, а саме, кожне проміжне значення, має бути розрахованим з кількістю значущих цифр, що принаймні вдвічі більше в порівнянні з кількістю цифр вихідних даних, як визначено в [52].

Порівняти отримані значення для кожної серії вимірювань із нормованими значенням, що вказані виробником у технічній документації на ВК.

Зафіксувати результат у протоколі повірки.

Зміна швидкості потоку рідини під час вимірювання, безпосередньо вливає на зміна МВ, що характеризується зміною тиску у трубопроводі. Тому, необхідно

контролювати значення зміни тиску під час вимірювання. Формула для розрахунку середньоквадратичної амплітуди зміни тиску через пульсації можна розраховується за формулою (5.24).

$$\Delta P_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[P(\tau)_i - P_{av}]^2}{n}}, \quad (5.24)$$

де ΔP_S - середньоквадратична амплітуда зміни тиску, [кПа];

$P(\tau)_i$ – тиск у певний момент часу, [кПа];

P_{av} – середнє значення тиску протягом усього часу вимірювання, [кПа].

Зафіксувати результат у протоколі повірки.

Оцінка наявності двофазного потоку можна здійснити за допомогою заздалегідь відомої густини потоку. Наприклад, густина бензину при 20°С складає $\rho_З$. А густина виміряна вимірювальним каналом ВК буде $\rho_В$. Різниця між значенням

$$\Delta\rho = |\rho_з - \rho_в|, \quad (5.25)$$

де, $\Delta\rho$ – різниця між значеннями густини продукту, [кг/м^3];

$\rho_з$ - значення густини продукту, виміряне перед вимірюванням, приведене до 20 °С, [кг/м^3];

$\rho_в$ - миттєве значення густини продукту, отримане з ІВК густини ВК, приведене до 20 °С, [кг/м^3].

Якщо, виміряні та приведені до 20 °С значення густини під час наливу визначеної дози, мають різницю більшу за 1 кг/м^3, АСН підлягає технічному обслуговуванню та налаштуванню.

Оформити результати вимірювань та результати обробки результатів вимірювань у протоколі повірки.

5.3 Оцінювання невизначеності результатів вимірювання масової витрати витратоміром Коріоліса

У зв’язку із необхідністю відповідності європейським вимогам, що обробки результатів вимірювання, згідно вимог [53] представлено спосіб оцінювання НРВ.

Для побудови модельного рівняння необхідно ідентифікувати основні (істотні) джерела невизначеності вимірювання МВ [54].

В даному випадку такими є:

- невизначеність типу А;

- невизначеність зразкових ЗВТ;

- невизначеність зчитування показів;

- невизначеність вторинного перетворювача;

- невизначеність пульсації потоку.

З урахуванням цих джерел модельне рівняння набуде вигляду [55]:

$$q_x = q_e + \Delta_e + \Delta_r + \Delta_p + \Delta_i, \quad (5.26)$$

де q_e – середнє значення показів еталону для контрольної точки;

Δ_e – складова, обумовлена невизначеністю зразкових ЗВТ;

Δ_r – складова, обумовлена похибкою зчитування показів ВК;

Δ_p – складова, обумовлена вкладом перетворювача;

Δ_i – складова, обумовлена наявністю пульсацій в потоці.

Оцінювання невизначеності результатів вимірювання складається з наступних пунктів:

1) Розрахунок середньоарифметичного відхилення результату вимірювань.

В таблиці 5.1 відображено приклад представлення даних, отриманих під час вимірювання ВК у складі АСН.

Таблиця 5.1

Результати вимірювання

	Вимірне значення об'єктом калібрування				Вимірне значення засобом калібрування			
№	$M_К$, кг	$V_К$, л	$\rho_К$, кг/м^3	t, °C	$M_К$, кг	$V_К$, л	$\rho_К$, кг/м^3	t, °C
n								

Розрахувати різницю (Δ_j) показів ВК від показів зразкового ЗВТ в j—ій точці згідно формули (5.27):

$$\Delta_j = q_j - q_{ej} \quad (5.27)$$

де q_j – покази ВК;

q_{ej} – покази зразкових ЗВТ.

Враховуючи різницю показів ВК від показів зразкового ЗВТ, розрахувати середньоарифметичне відхилення результату вимірювань за формулою (5.28):

$$\Delta_{\text{сер.}j} = \frac{\sum_1^j \Delta_j}{n} \quad (5.28)$$

де n – кількість вимірювань.

3) Розрахунок стандартної невизначеності за типом А.

Стандартну невизначеність середнього значення $u_a(q)$, обчислити за формулою (5.29):

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta_j - \Delta_{сер.})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (5.29)$$

4) Оцінювання складових стандартної невизначеності по типу В обумовленої невизначеністю зразкового ЗВТ.

Розширена невизначеність U_e еталону вказана у сертифікаті калібрування разом із значенням охоплення k. Складову невизначеність еталону, що враховується в бюджеті невизначеностей u_e (нормальний закон розподілу), розрахувати за формулою (5.30):

$$u_e = \frac{U_e}{k} \quad (5.30)$$

5) Оцінювання складових стандартної невизначеності по типу В обумовленої невизначеністю дискретністю показів.

Стандартну невизначеність, обумовленої дискретністю показів результатів вимірювання ВК, u_r обчислюється за формулою (5.31):

$$u_r = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad (5.31)$$

де d – дискретність показів результатів вимірювання ВК.

Якщо результат вимірювань отримують з вторинного перетворювача, рекомендовано вибрати дискретність з розрядністю не менше 0,0005. При перерахунку в кг/год.

6) Оцінювання складових стандартної невизначеності по типу В обумовленої вкладом перетворювача.

Розширена невизначеність перетворювача U_p вказана у сертифікаті калібрування на перетворювач разом із значенням коефіцієнту охоплення k.

Складову невизначеності, обумовленої вкладом перетворювача, врахувати в бюджеті невизначеностей u_p, розрахувати за формулою (5.32):

$$u_p = \frac{U_p}{k} \tag{5.32}$$

7) Оцінювання складових стандартної невизначеності по типу В обумовленої пульсацією потоку.

Складову невизначеності, обумовленої пульсацією потоку, врахувати в бюджет невизначеностей u_i, розрахувати за формулою (5.33):

$$u_i = \sum_{j=1}^{N} Q_{m(j+1)} \cdot I_{pj} \tag{5.33}$$

де, $Q_{m(j+1)}$ – точкова МВ в певний момент, [кг/с];

I_{pj} - індекс пульсації для x_j та x_{j+1}.

Індекс пульсацій, який визначається як відношення різниці $i+1$ та i витрати до середньої витрати:

$$I_P = \frac{(Q_m)_{i+1} - (Q_m)_i}{2 \cdot (Q_m)_{av}} \tag{5.34}$$

де I_p – індекс пульсації;

$(Q_m)_{i+1}$ – максимальна МВ в пульсуючому потоці, [кг/с];

$(Q_m)_i$ – мінімальна МВ в пульсуючому потоці, [кг/с];

$(Q_m)_{av}$ – середнє значення МВ в пульсуючому потоці, [кг/с].

8) Оцінювання коефіцієнтів кореляції.

Здійснюється оцінювання коефіцієнтів кореляції.

9) Визначення коефіцієнтів впливу.

В разі опосередкованих вимірювань необхідно враховувати внесок невизначеності кожної вхідної величини у невизначеність вимірюваної величини, що є добутком невизначеності вхідної величини на коефіцієнт впливу.

Значення коефіцієнтів впливу визначити формулою:

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial Y}{\partial X_i}\Big|_{X_1, X_2 \ldots\ldots X_m} \tag{5.35}$$

10) Оцінювання сумарної стандартної невизначеності.

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання $u_p(q)$, обчислюється за формулою (5.36):

$$u_c(q) = \sqrt{u_a^2(q) + (c_e u_e)^2 + (c_r u_r)^2 + (c_p u_p)^2 + (c_i u_i)^2} \qquad (5.36)$$

11) Оцінювання розширеної невизначеності.

Розширену невизначеність ВК обчислити за формулою (5.37):

$$U = k \cdot u_c(q), \qquad (5.37)$$

де k – коефіцієнт охоплення.

У багатьох практичних випадках при обчисленні невизначеностей результатів вимірювань роблять припущення про нормальність закону розподілу можливих значень вимірюваної величини і вважають коефіцієнт охоплення k =2, що визначає інтервал з рівнем довіри 95 %.

12) Бюджет невизначеності.

Для результатів вимірювань ВК у складі АСН, отриманих з ІВК МВ ВК, бюджет невизначеності вимірювання наведений в таблиці 5.2 [56].

Таблиця 5.2

Бюджет невизначеності вимірювання масової витрати

Вхідна величина X_i	Оцінка вхідної величини x_i	Стандартна невизначеність u_{xi}	Розподіл ймовірностей	Коефіцієнт впливу c_i	Внесок в невизначеність $u_c(y)$
Q_e	x_1	u_a	Нормальний	1	$c_a \cdot u_a$
Δ_e	x_2	u_e	Рівномірний	1	$c_e \cdot u_e$
Δ_r	x_3	u_r	Рівномірний	1	$c_r \cdot u_r$
Δ_p	x_4	u_p	Рівномірний	1	$c_p \cdot u_p$
Δ_i	x_5	u_i	Рівномірний	1	$c_i \cdot u_i$
q			$u_c(q)$		

Бюджет невизначеності складається із наступних складових: стандартна невизначеність за типом А, u_a; стандартна невизначеність за типом В обумовлена невизначеністю зразкових ЗВТ, u_e; стандартна невизначеність за типом В

обумовлена роздільною здатністю вихідного сигналу u_r; стандартна невизначеність за типом В обумовлена розрядністю вторинного вимірювального перетворювача u_p; стандартна невизначеність обумовлена пульсацією потоку, u_i.

В роботі [57] розглянуто метод розрахунку динамічної невизначеності.

Динамічну невизначеність вихідного сигналу певного ІВК витратоміру з відомою частотною характеристикою, можна виразити через квадратний корінь з інтеграла від добутку квадрата модуля частотної характеристики витратоміру і квадрата спектральної функції вхідного сигналу в широкому діапазоні частот [57]:

$$U_д = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|S(j\omega)|^2|X(j\omega)|^2 d\omega} \quad (5.38)$$

де $|S(j\omega)|$ - модуль частотної характеристики ІВК, що використовується при ДВ;

$X(j\omega)$ – спектральна функція вхідного сигналу, яка пов'язана з вхідною функцією часу $x(t)$ виразом Лапласа.

При ДВ дискретних в часі сигналів рівняння для розрахунку динамічної невизначеності, має вигляд:

$$U_д = \sqrt{\frac{T_a}{N}\sum_{k=0}^{N-1}\sum_{n=0}^{N-1} x^2(nT_a)e^{-j\frac{4\pi nk}{N}}A^2\left(k\frac{2\pi}{NT_a}\right)} \quad (5.39)$$

де $A\left(k\frac{2\pi}{NT_a}\right) = A(\omega) = |S(j\omega)|$ – амплітудно-частотна характеристика або модуль частотної характеристики, ІВК;

$\Delta\omega = \frac{2\pi}{NT_a}$ – відстань розташування дискретних значень частоти, [1/с];

T_a – час дискретизації, [с];

N – кількість вибірок;

$N\,T_a$ – сумарний час спостереження, [с].

При складанні звіту за результатами ДВ необхідно продемонструвати кількісні значення якості вимірювань, щоб їх достовірність можна було правильно оцінити. Без таких значень результати ДВ не можна порівняти ні між собою, ні з еталонними значеннями. Тому необхідно запропонувати методи оцінки якісних характеристик ДВ. При цьому необхідно враховувати той факт, що в динамічних вимірах на деякому етапі також буде присутній перехідний режим роботи вимірювальних приладів, протягом якого сигнал від виходу вимірювального приладу значно

змінюється з плином часу. Ці обставини обумовлені динамічних властивостях ВК, оскільки складаються вони, як правило, з набору різних мас і пружин та інших інерційних елементів, які призводять до прояву динамічної невизначеності. Рівняння перетворення, яке відображає його статичні властивості, неприпустимо в динамічному режимі. У цьому випадку ми повинні перейти до диференціальних рівнянь, які описують динамічну залежність між вихідними *y(t)* і вхідними значеннями *x(t)* ВК.

З огляду на вищевикладене, виникає необхідність розробки методів оцінки невизначеності ДВ, які б відповідали міжнародним вимогам до оцінки характеристик якості вимірювань, що є важливим науковим завданням в області метрології [58].

Якщо рівняння перетворювача при вимірюванні можна представити у вигляді [59]:

$$Y = K_C X, \tag{5.40}$$

де X - вимірюване значення фізичної величини (вхідний сигнал);

K_C - коефіцієнт перетворення вимірювального приладу;

Y - результат вимірювання (вихідний сигнал).

Тоді математичне сподівання вхідного сигналу буде дорівнює M[X], а математичне сподівання вихідного сигналу буде дорівнювати:

$$M[У] = K_C M[X], \tag{5.41}$$

де $M[Y]$ і $M[X]$ - відповідні математичні очікування вихідного і вхідного сигналів вимірювального приладу відповідно.

Спектральна щільність вхідного сигналу X(t) має вигляд:

$$H_x(\omega) = \lim(2T)^{-1} |X(j\omega)|^2 \text{ коли } T \to \infty. \tag{5.42}$$

Вираз для спектральної щільності вихідного сигналу може бути представлено:

$$H_y(\omega) = \lim(2T)^{-1} |Y(j\omega)|^2 \text{ коли } T \to \infty. \tag{5.43}$$

Зв’язок між вираженням вихідних і вхідних значень дає нам вираз для передавальної функції вимірювального приладу:

$$K_C(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\sum_{k=0}^{m} B_k s^k}{\sum_{q=0}^{n} A_q s^q}, \quad (5.44)$$

де *Y(s), X(s)* — операторні зображення вихідних сигналів *Y(t)* і *X(t)* вхідних сигналів відповідно;

k, q - порядок похідних *Y* і *X* відповідно;

A_q, B_k - коефіцієнти диференціального рівняння.

Тому можна написати, що:

$$H_y(\omega) = |K_C(j\omega)|^2 \, H_x(\omega), \quad (5.45)$$

де $K_C(j\omega)$ — частотна характеристика вимірювального перетворювача.

Спектральна щільність сигналу похибки, приведена до вхідного, буде дорівнює:

$$H_{\Delta X}(\omega) = \left|\frac{K_C(j\omega)}{K_C} - 1\right|^2 \, H_x(\omega), \quad (5.46)$$

де K_C - частотна характеристика вимірювального приладу для ω = 0.

Дисперсія вихідного сигналу σ_Y^2 для ДВ може бути визначена як квадратний корінь інтеграла спектральної щільності проведення вихідного сигналу над усіма частотами

$$\sigma_Y = \pi^{-1/2}\left(\int_0^{\infty} H_y(\omega) d\omega\right)^{1/2}. \quad (5.47)$$

З урахуванням рівнянь, дисперсії вихідного сигналу σ_Y^2 може бути представлена на основі спектральної щільності вхідного сигналу та частотної характеристики ІВК ЗВТ.

$$\sigma_Y = \pi^{-1/2}\left(T^{-1} \int_0^{\infty} |K_C(j\omega)|^2 |X(j\omega)|^2 d\omega\right)^{1/2}, \quad (5.48)$$

де $|K_C(j\omega)|$ - модуль частотної характеристики засобу вимірювання, що використовується для ДВ.

Аналогічним чином дисперсія похибки сигналу, зведена до вхідного, буде дорівнює:

$$\sigma_{\Delta X} = \pi^{-1/2}\left(\int_0^{\infty} \left|\frac{K_C(j\omega)}{K_C} - 1\right|^2 |X(j\omega)|^2 d\omega\right)^{1/2}, \quad (5.49)$$

Модуль частотної характеристики вимірювального приладу визначається за формулою:

$$|K_C(j\omega)| = \left(a^2(\omega) + b^2(\omega)\right)^{1/2}, \quad (5.50)$$

де a(ω) та b(ω) – відповідно, реальна та уявна частина частотної характеристики вимірювального приладу $|K_C(j\omega)|$.

Спектральна функція вхідного сигналу *X(jω)* пов'язана з його часовою функцією *X(t)* виразом Лапласа:

$$X(j\omega) = \int_0^\infty X(t)e^{-j\omega_0 t}dt, \quad (5.51)$$

де ω_0 - циклічні пульсації досліджуваного гармонічного сигналу (вхідний сигнал).

Циклічні пульсації ω_0 - це пульсації основної гармоніки досліджуваного вхідного сигналу, яка проходить через ІВК і спотворюється через обмеженість властивостей ІВК. Ця частота ω_0 виділяється з усього спектра частот для дослідження невизначеності вимірювання, що обумовлено обмеженою належністю вимірювального приладу при проходженні через нього періодичного сигналу на певній частоті.

Для визначеного інтервалу часу знак нескінченності може бути замінений загальним часом спостереження *T*.

Динамічна похибка вимірювального перетворювача, в часовій області може бути представлена виразом:

$$\Delta X(t) = \pi^{-\frac{1}{2}} \int_0^\infty \sigma_{\Delta x} e^{j\omega t} d\omega = \pi^{-\frac{1}{2}} \left[\int_0^\infty \sigma_{\Delta x} \cos(\omega t) d\omega + j \int_0^\infty \sigma_{\Delta x} \sin(\omega t) d\omega\right] \quad (5.52)$$

Таким чином, динамічна похибка, яка вводиться через обмеженість властивостей вимірювального приладу, що використовується для ДВ, може бути оцінена в часовій області, виходячи з модельного рівняння спектральної функції вхідного сигналу і частотної характеристики вимірювального приладу.

Оскільки вираз складається з дійсної та уявної частин, а при оцінці похибки нас цікавить амплітудне значення динамічної похибки, вираз (5.52) може бути записано як:

$$|\Delta X(t)| = \left[\left(\int_0^\infty \pi^{-1/2} \sigma_{\Delta x} \cos(\omega t) d\omega\right)^2 + \left(\int_0^\infty \pi^{-1/2} \sigma_{\Delta x} \sin(\omega t) d\omega\right)^2\right]^{1/2}. \quad (5.53)$$

Коли, наприклад, попередні відомості про амплітуду частотного спектра виміру доступні з точки зору частотної функції, то рівняння (5.53) можна переписати у вигляді:

$$|\Delta X(t)| = \left[\left(\int_0^{\pi F_s} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta x}\cos(\omega t)d\omega\right)^2 + \left(\int_0^{\pi F_s} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta x}\sin(\omega t)d\omega\right)^2\right]^{1/2}, \quad (5.54)$$

де $F_s = 1/T_s$ - частота дискретизації.

Згідно з [60] невизначеність, пов'язана з похибкою оцінки, потім дається як дисперсія відповідного прямокутного розподілу ймовірностей, тобто динамічна невизначеність вимірювального приладу може бути оцінена з формули:

$$|u_D(t)| = \sqrt{\left[\left(\int_0^{\pi F_s} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta x}\cos(\omega t)d\omega\right)^2 + \left(\int_0^{\pi F_s} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta x}\sin(\omega t)d\omega\right)^2\right]} \Big/ \sqrt{3}. \quad (5.55)$$

Оброблений сигнал з ВК за модифікації конкретного вимірювача можна отримати з частотного, імпульсного та токового виходу [61].

5.4 Рекомендації щодо підвищення точності динамічних вимірювань витратоміру Коріоліса в умовах змінних параметрів потоку нафтопродуктів

За результатами досліджень отримано теоретичні та емпіричні докази впливу зміни під час вимірювання параметрів потоку НП, таких як: зміна швидкість потоку і відповідно зміни МВ; зміна тиску і відповідно появи пульсації, а також наявності двофазного потоку (рідина і газ).

Для контроль зміни швидкості потоку та рівня пульсації, розроблено спосіб оцінювання складової невизначеності, що залежності від частоти отримання результатів вимірювання з сенсорів ВТ.

Метод полягає у визначені різниці зміни МВ з урахуванням роздільної здатності вимірювального перетворювача, між двома послідовними результатами вимірювання та визначенням різниці між вимірюваними значеннями. Через те, що основним параметром МВ вимірювального перетворювача ВК є зсув фази, через зміну швидкості та інерційність вимірювального перетворювача є вірогідність отримання виміряних значень, які не враховують досить швидку зміну вхідного сигналу. Врахувавши ці особливості, можна оцінити похибку вимірювання обумовлену пульсацією потоку витратоміром Коріоліса за формулою:

$$\Delta_I = \left(\sum_{i=1}^{N} x_{i+1} \cdot I_{pi}\right)\left({}^{f_I}/_{f_K}\right) \quad (5.56)$$

де, Δ_I – похибка, обумовлена пульсацією потоку, [кг/с];

x_{i+1} – точкова МВ в певний момент, [кг/с];

I_{pi} - індекс пульсації для x_i та x_{i+1};

f_I – частота зчитування показів з уніфікованого сигналу;

f_K – частота зчитування показів з сенсорів витратомірних трубок.

Експериментально та теоретично визначено критерій для контролю максимально значення індексу пульсації при якому похибка вимірювання обумовлена пульсацією потоку витратоміром Коріоліса не впливає на загальну похибку і не буде вносити вклад у НРВ при значені межі за 0,001 [62].

Зміна швидкості потоку рідини під час вимірювання, безпосередньо вливає на зміна МВ, що характеризується зміною тиску у трубопроводі. Тому, необхідно контролювати значення зміни тиску під час вимірювання [63]. Формула для розрахунку середньоквадратичної амплітуди зміни тиску через пульсації можна розраховується за формулою (5.57).

$$\Delta P_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[P(\tau)_i - P_{av}]^2}{n}}, \quad (5.57)$$

де, ΔP_S - середньоквадратична амплітуда зміни тиску, [кПа];

$P(\tau)_I$ – тиск у певний момент часу, [кПа];

P_{av} – середнє значення тиску протягом усього часу вимірювання, [кПа].

Допустиме значення при якому зміна тиску в трубопроводі за ВК та у вимірювальних трубках ВК не буде вносити вклад у комбіновану НРВ при значені менше за 0,2 бар.

Оцінка наявності двофазного потоку можна здійснити за допомогою заздалегідь відомої густини потоку. Наприклад, густина бензину при 20°С складає $\rho_З$. А густина виміряна вимірювальним каналом ВК буде $\rho_В$. Різниця між значенням

$$\Delta\rho = |\rho_з - \rho_в|, \quad (5.58)$$

де, $\Delta\rho$ – різниця між значеннями густини продукту;

$\rho_з$ - значення густини продукту, виміряне перед вимірюванням, приведене до 20 °С;

$\rho_в$ - миттєве значення густини продукту, отримане з ІВК густини ВК, приведене до 20 °С.

Запропоновано використовувати як критерій контролю відповідності густини, в розмірі ±0,1% від заданого значення, тобто від $\rho_з$. Або встановлення меж контролю через розрахунок зміни густини при зміні температури НП в залежності від коефіцієнту розширення НП від температури, що становить -0,0005 до -0,0008.

Ці методи можуть використовуватися окремо або в поєднанні залежно від конкретних потреб та умов системи [64].

У випадку коли під час контролю параметрів потоку показники не в допустимих межах рекомендовано встановити регулюючу заслінку.

За допомогою регулюючої заслінки можна здійснити вплив на параметри потоку та встановити оптимальну швидкість потоку та тиску рідини у трубопроводі і у витратомірі Коріоліса, завдяки чому параметри потоку будуть відповідати межам контролю.

Регулююча заслінка зображена на рис. 5.1.

Рис. 5.1 Регулююча заслінка

Заслінка – регулюючий засіб, що застосовується для зміни пропускної спроможності трубопроводу за рахунок повороту заслінки. Регулююча заслінка являє собою кільцевий корпус у якому на валу, розташованому перпендикулярно потоку, обертається заслінка[2].

Автоматизована система управління заслінкою регулювання у трубопроводах з потоком рідини призначене для ефективного та автоматичного керування заслінкою з метою контролювання потоку рідини.

Основні функції цієї системи включають:

- система автоматично контролює рівень відкриття або закриття заслінки або регулювальних пристроїв з метою збалансування обсягу потоку рідини у трубопроводі відповідно до розрахованих значень індексу пульсації;
- шляхом регулювання заслінки система забезпечує підтримку оптимального тиску рідини у трубопроводі з урахуванням вимог контролю процесу;
- АСН контролює параметри рідини, такі як тиск та МВ, з метою забезпечення відповідності їх заданим значенням;
- АСН може автоматично реагувати на надмірний тиск або інші небезпечні умови у трубопроводі шляхом регулювання заслінки або відключення потоку;
- АСН може автоматично адаптуватись до змінних умов у трубопроводі та реагувати на них шляхом автоматичного регулювання заслінки згідно з програмованими алгоритмами керування;
- АСН мають можливість віддаленого керування через мережу, що дозволяє операторам контролювати та керувати процесами віддалено.

Загалом, автоматизована система управління заслінкою регулювання в трубопроводах з потоком рідини спрощує процес контролю неінформативних параметрів потоку рідини та забезпечує ефективне та надійне управління системою.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

Удосконалена методика повірки, що встановлює вимоги до процедури перевірки ВК у складі АСН, основні етапи, зразкові ЗВТ, умови проведення вимірювань, а також методи обробки результатів вимірювань. Описані вимоги до проведення повірки ВК у складі АСН, які застосовуються для вимірювання МВ та/або ОВ і густини потоку рідини в діапазоні вимірювань МВ від 1000 кг/год до 180000 кг/год. Описано метод оцінювання дійсних значень основних метрологічних характеристик ВК у складі АСН. Описано метод оцінювання характеристик параметрів потоку, вимірювання якого виконується додатковими вимірювачами у складі АСН.

Наведено рекомендації щодо підвищення точності вимірювання витратоміром Коріоліса в умовах змінних параметрів потоку НП за рахунок контролю параметрів зміни швидкість потоку і відповідно зміни МВ, зміна тиску і відповідно появи пульсації, а також наявності двофазного потоку (рідина і газ).

Представлено спосіб контролю зміни тиску у трубопроводі та у витратомірі Коріоліса через середньоквадратичну амплітуду зміни тиску.

Проаналізовано способи контролю параметрів потоку зі зміною швидкості потоку. Представлено спосіб розрахунку індексу пульсації через обробку результатів вимірювання ВК.

Проаналізовано способи контролю двофазного потоку в трубопроводі. Представлено спосіб контролю через результати вимірювання ВК із заздалегідь відомою густиною НП при 20°С.

Надано рекомендації, у випадку коли під час контролю неінформативних параметрів потоку показники не відповідають встановленим межах. За допомогою регулюючої заслінки можливо здійснити вплив на параметри потоку та встановити оптимальну швидкість потоку та тиску рідини у трубопроводі і у ВК, завдяки чому, під час контролю, параметри потоку будуть відповідати встановленим межам.

ВИСНОВКИ

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності вимірювання масової витрати та густини нафтопродуктів витратоміром Коріоліса. Для досягнення цієї мети були вирішені такі задачі:

- виконано аналіз існуючих методів та засобів вимірювання масової витрати рідини;

- виконано аналіз відомих методів та засобів вимірювання масової витрати за принципом сили Коріоліса;

- виконано обґрунтування неінформативних параметрів потоку, зміна яких при вимірюванні ВК впливає на точність вимірювання МВ та густини потоку рідини;

- оцінено вплив неінформативних параметрів потоку, зміна яких під час вимірювання ВК, збільшують похибку вимірювання ВК та становлять додаткову складову похибки вимірювання;

- виконано аналіз відомих функцій перетворення ВК;

- виведено функцію перетворення, що однозначно пов’язує вихідну величину, а саме, МВ із вхідними величинами, а саме, площа поперченого перерізу, жорсткість і довжину ВТ, а також, зміна швидкості та густину потоку;

- оцінено похибку квантування ВК за вимірювальним каналом МВ;

- розроблено математичну модель ВК у вигляді диференційного рівняння та оцінено динамічні метрологічні характеристики;

- виконано аналіз відомих методів обробки сингалів ВК;

- розроблено схему функціональну мікропроцесорну ВК;

- виконано аналіз методів та засобів вимірювання тиску і вибрано сенсор тиску для удосконалення ІВС ВК у складі АСН;

- розроблено експериментальну установку для дослідження впливу зміни параметрів потоку рідини на точність вимірювання ВК;

- визначено основні параметри НП для проведення експериментального дослідження;

- виконано експериментальне дослідження впливу зміни параметрів потоку НП, а саме ДП та бензину, на точність вимірювання МВ та густини ВК у складі АСН;

- виконано експериментальне дослідження впливу зміни параметрів потоку НП, а саме ДП та бензину із застосуванням удосконаленої ІВС ВК;

- виконано порівняння результатів вимірювання із застосуванням удосконаленої ІВС ВК та без неї. Похибка вимірювання зменшилась втричі для вимірювання МВ потоку бензину та вдвічі для вимірювання МВ потоку ДП. Це є підтвердження ефективності удосконаленої ІВС ВК.

- оцінено бюджет складових невизначеності результатів вимірювання, яка враховує складову невизначеності результатів вимірювання, що обумовлена зміною МВ вираженої через індекс пульсації;

- виконано порівняння оцінок невизначеності результатів вимірювання при застосуванні зразкових засобів вимірювання із оцінкою невизначеності вимірювання з врахуванням складової невизначеності вимірювання обумовленою індексом пульсації. Отримано різницю, яка становить 2,7% для потоку бензину та отримано різницю, яка становить 6,7% для потоку ДП. Це є підтвердженням адекватності оцінювання невизначеності з урахуванням складової обумовленої пульсацією потоку.

- отримала подальший розвиток методика повірки ВК у складі АСН, яка включає в себе етапи перевірки роботи ВК у складі АСН, які враховують зміну швидкості потоку, зміну тиску та появу двофазного потоку під час вимірювання МВ;

- оцінено критерії зміни параметрів потоку рідини, що впливають на точність вимірювання ВК, які дозволять контролювати виконання вимірювань за заданих умов, що підвищує точність вимірювання ВК;

- надано рекомендації, щодо підвищення точності динамічних вимірювань МВ та густини потоку ВК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] С.А. Чеховський та ін., *Метрологія і технологічні вимірювання у нафтовій та газовій промисловості*. Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2010.

[2] І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький та С.М. Швед, *Автоматизація виробничих процесів*. Київ, Україна: Видавництво Ліра-К, 2015.

[3] Й. Й. Білинський, М. О. Стасюк та М. В. Гладишевський «Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та їхня класифікація» *НаукПраці ВНТУ*, № 1, с.1-11, 2015. Режим доступу: http://praci.vntu.edu/article/view/3970/5732.

[4] І. Костик «Вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку», дис.канд.наук., нац. ун-т «Львівська політехніка», Львів, 2020.

[5] В. О. Поджаренко, В. М. Севастьянов та В. П. Осадчий, *Метрологічне забезпечення тахометричних вимірювальних перетворювачів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2009.

[6] С. Г. Бондаренко, Д. М. Складанний та А. О. Абрамова, *Технологічні вимірювання і прилади. Вимірювання рівня та витрат*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.

[7] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Г. Володарський та В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань*. Херсон, Україна: Олді-Плюс, 2013.

[8] Н. М. Піндус, *Технологічні вимірювання і прилади*, Івано-Франківськ, Україна : ІФНТУНГ, 2005.

[9] K. Ferrara, V.R. Algazi, J. Liu «*The effect of frequency dependent scattering and attenuation on the estimation of blood velocity using ultrasound*», *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec, Freq. Contr.* Vol. 22, №3, pp.754–767 1992.

[10] М. К. Філяшкін, *Мікроелектромеханічні системи*. Київ, Україна: НАУ, 2019.

[11] Й. І. Стенцель та В. В. Тіщук, *Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній промисловості*. Луганськ, Україна: Східноукраїнський держ. ун-т, 2020.

[12] В. С. Вощинський, *Інформаційно-вимірювальні комплекси*. Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2010.

[13] Д.М. Нестерчук, С.О. Квітка та С.В. Галько, *Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин*. Мелітополь, Україна: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017.

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

[15] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Сучасні системи управління автоматизованим наливом нафтопродуктів на нафтобазах. Фактори, що впливають на точність вимірювання» на *IV міжнародну наукову конференцію «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)»,* Вінниця, 2017. Доступ:https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18849/45230.pdf?sequence=2

[16] В.Б. Большаков та Н.І. Косач, «Вимірювання витрати рідини і газу із застосуванням коріолісових витратомірів». *ННЦ «Інститут метрології», Метрологія*, с. 503-505, 2012.

[17] M. Henry, M. Tombs, M. Duta, F.B. Zhou, R. Mercado, F. Kenyery, J. Shen, M. Morles, C. Garcia and R. Langansan “Two-phase flow metering of heavy oil using a Coriolis mass flow meter: A case study”. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(6), pp. 399-413, 2006. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2006.07.008.

[18] M. Henry, M. Tombs, M. Zamora and F. Zhou “Coriolis Mass Flow Metering for Three-Phase Flow: A Case Study”. *University of Oxford*. Vol. 30, pp. 112-122 2013. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.01.003.

[19] Л.В. Возняк, П.Р. Гімер, М.І. Мердух та О.В. Паневник, *Гідравліка,* Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2012.

[20] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Контроль стану потоку та режиму течії нафтопродуктів на основі вимірювання густини та масової витрати» на *XV міжнародну конференцію «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020)»,* Вінниця, 2020 р.

[21] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Вплив хаотичної зміни швидкості потоку нафтопродуктів на точність вимірювання витратоміру Коріоліса», *Вісник ВПІ,* № 1, с. 14-20, 2021. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-14-20.

[22] О.Й. Рішан, А.П. Ладанюк та І.В. Ельперін, *Метрологія, технологічні вимірювання та прилади*. Київ, Україна: НУХТ, 2010.

[23] R.C. Baker “Coriolis flowmeters: industrial practice and published information”. *Flow Measurement and Instrumentation*. vol. 5, № 4, pp. 229-246, 1994. https://doi.org/10.1016/0955-5986(94)90027-2

[24] Nils T.Basse “A review of the theory of Coriolis flowmeter measurement errors due to entrained particles” *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. Zsch, pp. 107-118, 2014. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.03.009.

[25] С.А. Чеховський, *Математичне моделювання фізичних процесів*. Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2003.

[26] L. Wang, J. Liu, Y. Yan, X. Wang and T. Wang “Gas–Liquid Two-Phase Flow Measurement Using Coriolis Flowmeters Incorporating Artificial Neural Network, Support Vector Machine, and Genetic Programming Algorithms” *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, Vol. 66, № 5, pp 852-868, 2017. https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2634630.

[27] M. Zamora and M. Henry “An FPGA Implementation of a Digital Coriolis Mass Flow Metering Drive System” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 55, iss. 7 pp. 1-11, 2008. https://doi.org/10.1109/TIE.2008.925646.

[28] G. R. Duffill, S. M. Jones, and A. T. Patten, *“Meter electronics and methods for determining a liquid flow fraction in a gas flow material,”* U.S. Patent 7974792, July 05, 2011.

[29] Y. Tu, H. Yang, H. Zhang, and X. Liu, “CMF Signal Processing Method Based on Feedback Corrected ANF and Hilbert Transformation,” *Meas. Sci. Rev.*, vol. 14, № 1, 2014. https://doi.org/10.2478/msr-2014-0007.

[30] A. Uehara, T. Hashizume, T. Wakui, A. Yoshino, A. Kadoguchi, and N. Miyaji, “Diagnosis of aerated flow at water line with Coriolis flowmeter using Hilbert transform” *Proc. SICE Annu. Conf. 2010*, Taiwan, 2010, pp. 1682– 1687.

[31] W. Lin and J.-L. Zhao, “A Novel Method Based on Hilbert Transform for Signal Processing of Coriolis Mass Flowmeter,” *Int. J. Pattern Recognit. Artif. Intell*., vol. 32, № 2, p. 1858001, 2018. https://doi.org/10.1142/S0218001418580016.

[32]. T. Shen, Y. Tu, and H. Zhang, “A novel time varying signal processing method for Coriolis mass flowmeter” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 85, № 6, p. 65116, 2014. https://doi.org/10.1063/1.4884898.

[33]. D. Feng, S. Fan, and D. Zheng, “A time-varying signal processing method for Coriolis mass flowmeter based on adaptive filter” *Trans. Inst. Meas. Control, ,* vol. 40, № 1, pp. 261–268, 2018. https://doi.org/10.1177/0142331216652955

[34] M. Li and M. Henry «Complex signal processing for coriolis mass flow metering in two-phase flow» *Flow Measurement and Instrumentation,* vol. shch, pp. 104-115, 2018.

[35] Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько та Т.Г. Бойко, *Метрологія та вимірювальна техніка*. Львів, Україна: «Бескид-Біт», 2003.

[36] М. Дорожовець В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек та А. Ковальчик, *Основи метрології та вимірювальної техніки. Т.1*. Львів, Україна: Вид-во нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005.

[37] М. Дорожовець В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек та А. Ковальчик, *Основи метрології та вимірювальної техніки. Т.2*. Львів, Україна: Вид-во нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005.

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

[39] В. М. Романів та А. Г. Винничук**,** *Вимірювальні перетворювачі*. Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2005.

[40] В. І. Мілих та О. О. Шавьолкін, *Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка*. Київ, Україна: Каравела, 2012.

[41] Н. М. Піндус, *Інформаційно-вимірювальні комплекси в нафтогазовій промисловості*. Івано- Франківськ, Україна: ІФНТУНГ Факел, 2008.

[42] Л. А. Витвицька та Ю. М. Кучірка, *Теорія автоматичного керування* Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2015.

[43] Г. В. Микитин. *Основи метрології*, Львів, Україна: Сполом, 2008.

[44] О.М. Василевський та Д.М. Компанець «Опрацювання результатів вимірювання та калібрування автоматизованої системи наливу на нафтобазах» на *XIV міжнародну науково-практичну конференцію «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІІРТК-2021)»*, Київ, 2021. Режим доступу: https://www.researchgate.net/profile/Oleksandr-Vasilevskyi/publication/351812810_opracuvanna_rezultativ_vimiruvanna_ta_kalibruvanna_avtomatizovanoi_sistemi_nalivu_na_naftobazah/links/60ab926e92851ca9dcde3178/opracuvanna-rezultativ-vimiruvanna-ta-kalibruvanna-avtomatizovanoi-sistemi-nalivu-na-naftobazah.pdf

[45] Н. М. Піндус, *Вимірювальний експеримент та обробка результатів*. Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2013.

[46] П. Д. Стухляк, О. В. Іванченко, А. В. Букетов та М. А. Долгов, *Теорія інформації (інформаційно-вимірювальні системи, похибки, ідентифікація)*. Херсон, Україна: Айлант, 2011.

[47] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Контроль параметрів вимірювання тиску системою автоматизованого наливу нафтопродуктів на нафтобазах» на *V міжнародну наукову конференцію «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2019)»,* Вінниця, 2019. Режим доступу: https://mpa.vntu.edu.ua/fdb/740/main/Abstracts_2019.pdf

[48] ДП "УкрНДНЦ", 2021. ДСТУ ISO 10790:2021. *Вимірювання потоку плинного середовища в закритих каналах. Указівки щодо обирання, установлювання та застосовування коріолісових витратомірів (вимірення масової витрати, густини та об'ємної витрати)*, (ISO 10790:2015, IDT). Київ: ДП "УкрНДНЦ".

[49]. ДП "УкрНДНЦ", 2022. ДСТУ OIML R 117-1:2022 «*Динамічні вимірювальні системи для рідин, крім води. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги»* (OIML R 117-1:2019, IDT). Київ: ДП "УкрНДНЦ".

[50]. ДП "УкрНДНЦ", 2022. ДСТУ OIML R 117-2:2022 *«Динамічні вимірювальні системи для рідин, крім води. Частина 2. Метрологічний контроль та випробування дієздатності»* (OIML R 117-2, edition 2019, IDT). Київ: ДП "УкрНДНЦ".

[51]. ДП "УкрНДНЦ", 2022. ДСТУ OIML R 117-3:2022 *«Динамічні вимірювальні системи для рідин, крім води. Частина 3. Форма протоколу випробування»* (OIML R 117-3, edition 2019, IDT). Київ: ДП "УкрНДНЦ".

[52] Держспоживстандарт України 2005. ДСТУ ГОСТ ИСО 5725-2 «*Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 2. Основний метод визначення повторюваності і відтворюваності стандартного методу вимірювання*» (ГОСТ ИСО 5725-2-2003, IDT). Київ: Держспоживстандарт України.

[53] ДП "УкрНДНЦ", 2019. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «*Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій»* (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT). Київ: ДП "УкрНДНЦ".

[54] O. Vasilevskyi, V. Didych, A. Kravchenko, M. Yakovlev, I. Andrikevych, D. Kompanets, Y. Danylyuk, W. Wójcik and A. Nurmakhambetov. “Method of evaluating the level of confidence based on metrological risks for determining the coverage factor in the concept of uncertainty”, *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018,* 108082C, 2018. https://doi.org/10.1117/12.2501576.

[55] І.А. Дудатьєв та Д.М. Компанець, «Метод контролю плинного середовища та спосіб оцінювання складової невизначеності результатів вимірювання витратоміра Коріоліса», *Вісник ВПІ,* №1, с. 6-10, 2024. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-172-1-6-10.

[56] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Оцінювання невизначеності результатів динамічних вимірювань витратоміром Коріоліса у складі

автоматизованої системи наливу» на *X Всесвітній конгрес ,,Авіація в XXI столітті”* Київ, 2022. Режим доступу: https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/view/8819

[57] O. Vasilevskyi, P. Kulakov, D. Kompanets, O. Lysenko, V. Prysyazhnyuk, W. Wójcik and D. Baitussupov. “A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices”, *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108082E, 2018. https://doi.org/10.1117/12.2501578.

[58] О. М. Василевський, «Оцінювання невизначеності динамічних вимірювань». *Вісник ВПІ*, № 3, с. 9–13, 2010.

[59] О. М. Василевський та В. В. Присяжнюк, *Оцінювання непевності результатів вимірювань, контроль та випробувань*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2020.

[60] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, "Evaluation of Measurement Data – Supplement 2 to the 'Guide to the Expre ssion of Uncertainty in Measurement' – Extension to any number of output quantities". *Joint Committee for Guides in Metrology* - JCGM 102, 2011.

[61] О. М. Василевський, В. Ю. Кучерук та Є. Т. Володарський, *Основи теорії невизначеності вимірювань*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.

[62] О.М. Василевський та О. Г. Ігнатенко, *Нормування показників надійності технічних засобів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2013.

[63] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Параметри потоку нафтопродуктів, що впливають на точність вимірювання витратоміру Коріоліса» на *L науково-технічну конференцію підрозділів Вінницького національного технічного університету*, Вінниця, 2021. Режим доступу:https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2021/paper/download/12914/10846.

[64] Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько та Т.Г. Бойко, *Методи та засоби вимірювань неелектричних величин.* Львів, Україна: вид-во, держ. ун-ту «Львівська політехніка», 2003.

ДОДАТКИ

Додаток А
Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[1] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Вплив хаотичної зміни швидкості потоку нафтопродуктів на точність вимірювання витратоміру Коріоліса», *Вісник ВПІ,* № 1, с. 14-20, 2021. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-14-20.

[2] І.А. Дудатьєв та Д.М. Компанець, «Метод контролю плинного середовища та спосіб оцінювання складової невизначеності результатів вимірювання витратоміра Коріоліса», *Вісник ВПІ,* №1, с. 6-10, 2024. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-172-1-6-10

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у квазіперіодичному виданні, що внесено до міжнародних науково-метричних баз Scopus / WoS:

[3] O. Vasilevskyi, P. Kulakov, D. Kompanets, O. Lysenko, V. Prysyazhnyuk, W. Wójcik and D. Baitussupov. “A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices”, *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108082E, 2018. https://doi.org/10.1117/12.2501578.

[4] O. Vasilevskyi, V. Didych, A. Kravchenko, M. Yakovlev, I. Andrikevych, D. Kompanets, Y. Danylyuk, W. Wójcik and A. Nurmakhambetov. “Method of evaluating the level of confidence based on metrological risks for determining the coverage factor in the concept of uncertainty”, *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108082C, 2018. https://doi.org/10.1117/12.2501576.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[5] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Сучасні системи управління автоматизованим наливом нафтопродуктів на нафтобазах. Фактори, що впливають на точність вимірювання» на *IV міжнародну наукову конференцію «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)»,* Вінниця, 2017. Режим доступу: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18849/45230.pdf?sequence=2

[6] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Контроль параметрів вимірювання тиску системою автоматизованого наливу нафтопродуктів на нафтобазах» на *V міжнародну наукову конференцію «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2019)»,* Вінниця, 2019. Режим доступу: https://mpa.vntu.edu.ua/fdb/740/main/Abstracts_2019.pdf

[7] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Параметри потоку нафтопродуктів, що впливають на точність вимірювання витратоміру Коріоліса» на *L науково-технічну конференцію підрозділів Вінницького національного технічного університету*, Вінниця, 2021. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2021/paper/download/12914/10846

[8] О.М. Василевський та Д.М. Компанець, «Оцінювання невизначеності результатів динамічних вимірювань витратоміром Коріоліса у складі автоматизованої системи наливу» на *X Всесвітній конгрес ,,Авіація в XXI столітті”* Київ, 2022. Режим доступу: https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/view/8819

Додаток Б

Протоколи повірки витратомірів

ДП "Укрметртестстандарт"
м. Київ, вул. Метрологічна, 4, т. 526-53-89
Науково-виробничий відділ метрологічного забезпечення вимірювань кількості теплоти та рідин (відділ № 24
Лабораторія гідромеханічних вимірювань

Дата друку 04.01.2016

M*

Протокол повірки № 6587

Дата виконання 04.01.2016 Вид роботи: П

Тип Promass 83 F
Заводський номер A906A802000
Рік виготовлення 2008
DN 80
Замовник: НВКП "Фотоніка"

Діапазон вимірювань: q_{Mmax} = 180,00 т/год
q_{Mmin} = 1,800 т /год

Стабільність за відсутності витрати (Zero stability) 9 кг /год

Примітка:

Допустима похибка:
При вимірюванні масової витрати та маси рідини: ±[0,1+ZS/q*100]%, де ZS - стабільність показів за нульової витрати (залежить від типорозміру первинного перетворювача), кг/год;
q - середнє значення витрати протягом одного вимірювання, кг/год.
При вимірюванні об'ємної витрати та об'єму рідини: ±[0,15+ZS/q*100]%.

*Вимірювання маси води

Витрата	Маса за лічильником	Маса за еталоном	Час	Темпер. води	Темпер. повітря	Відносна вологість	Атмосферн. тиск	Коефіцієнт виштовх. сили	Середня витрата	Відносна похибка	Границі допустимої похибки	Примітка
т/год	кг	кг	с	°C	°C	%	кПа		т/год	%	± ...%	
90,000	2497,229	2495,225	92,1	18,91	21,6	24,6	99,24	1,00102687	97,576	-0,02	± 0,11	
50,000	2494,604	2492,7	190,0	18,98	21,7	24,3	99,23	1,00102645	47,230	-0,03	± 0,12	
25,000	1246,792	1246	173,5	18,99	21,6	24,1	99,21	1,00102662	25,849	-0,04	± 0,13	
9,000	279,254	279,3742	110,9	19,19	21,3	24	99,19	1,00102756	9,071	-0,15	± 0,2	
4,500	249,369	249,304	184,9	19,24	22,12	22,7	99,15	1,00102432	4,855	-0,08	± 0,29	

Рис. Б.1 Протокол повірки витратоміру Коріоліса, що використовувався для вимірювання масової витрати дизельного палива

ДП "Укрметртестстандарт"
м. Київ, вул. Метрологічна, 4, т. 526-53-89
Науково-виробничий відділ метрологічного забезпечення вимірювань кількості теплоти та рідин (відділ № 24
Лабораторія гідромеханічних вимірювань

Дата друку 04.01.2016

M*

Протокол повірки № 6588

Дата виконання 04.01.2016 Вид роботи: П

Тип Promass 83 F
Заводський номер A906A002000
Рік виготовлення 2008
DN 80
Замовник: НВКП "Фотоніка"

Діапазон вимірювань: q_{Mmax} = 180,00 т/год
q_{Mmin} = 1,800 т /год

Стабільність за відсутності витрати (Zero stability) 9 кг /год

Примітка:

Допустима похибка:
При вимірюванні масової витрати та маси рідини: ±[0,1+ZS/q*100]%, де ZS - стабільність показів за нульової витрати (залежить від типорозміру первинного перетворювача), кг/год;
q - середнє значення витрати протягом одного вимірювання, кг/год.
При вимірюванні об'ємної витрати та об'єму рідини: ±[0,15+ZS/q*100]%.

*Вимірювання маси води

Витрата	Маса за лічильником	Маса за еталоном	Час	Темпер. води	Темпер. повітря	Відносна вологість	Атмосферн. тиск	Коефіцієнт виштовх. сили	Середня витрата	Відносна похибка	Границі допустимої похибки	Примітка
т/год	кг	кг	с	°C	°C	%	кПа		т/год	%	± ...%	
90,000	2498,099	2495,055	95,3	19,86	23,3	24,1	99,98	1,00102862	94,242	0,02	± 0,11	
50,000	2495,845	2494,43	184,7	19,94	22,9	24	99,98	1,00103011	48,614	-0,05	± 0,12	
25,000	1247,955	1246,87	176,5	19,97	22,7	23,5	99,97	1,00103080	25,432	-0,02	± 0,14	
9,000	279,204	279,241	110,8	20,13	22,4	23,3	98,95	1,00102138	9,075	-0,12	± 0,2	
4,500	248,964	249,392	185,1	20,13	23	23	98,97	1,00103946	4,850	-0,27	± 0,29	

Рис. Б.2 Протокол повірки витратоміру Коріоліса, що використовувався для вимірювання масової витрати бензину

Додаток В

Впровадження результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи та організації освітнього процесу, канд.техн. наук, доцент

_____ Олександр ПЕТРОВ

«14» 05 2024 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Компанця Дмитра Миколайовича «Динамічні вимірювання параметрів потоку нафтопродуктів витратоміром Коріоліса» у навчальний процес

Члени комісії у складі: завідувача кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем д-р. техн. наук, професора Осадчука О.В., д-р. техн. наук, професора Семенова А.О., канд. техн. наук, доцента Дудатьєва І.А. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Компанця Дмитра Миколайовича на тему «Динамічні вимірювання параметрів потоку нафтопродуктів витратоміром Коріоліса», яка виконана під науковим керівництвом кандидата технічних наук, доцента кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету Дудатьєва Ігоря Андрійовича за спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка у навчальний процес вивчення дисципліни «Вимірювальні перетворювачі» для студентів спеціальності 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка та 175 – Інформаційні вимірювальні технології.

Таким чином, комісія констатує, що наведені результати дисертаційної роботи Компанця Д.М. використовуються в навчальному процесі у Вінницькому національному технічному університеті.

Завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем доктор технічних наук, професор _____ Олександр ОСАДЧУК

Професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем доктор технічних наук, професор _____ Андрій СЕМЕНОВ

Доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем кандидат технічних наук, доцент _____ Ігор ДУДАТЬЄВ

Фармак

30.05.2024 № 3005/10

На № _____ від _____

Лист-відгук

про застосування в АТ «Фармак» результатів дисертаційної роботи «Динамічні вимірювання параметрів потоку нафтопродуктів витратоміром Коріоліса», виконаної у Вінницькому національному технічному університеті

Даним листом підтверджуємо, що у науково-дослідних роботах, які виконуються у структурному підрозділі, дільниці метрології АТ «Фармак», впроваджено наукові результати, отримані під час виконання дисертаційної роботи Компанця Дмитра Миколайовича «Динамічні вимірювання параметрів потоку нафтопродуктів витратоміром Коріоліса», виконаної в Вінницькому національному технічному університеті, а саме удосконалений метод перевірки метрологічних характеристик витратомірів, що використано у модифікованій методиці калібрування. Представлений метод перевірки враховує зміну параметрів потоку рідини під час перевірки метрологічних характеристик. Використано спосіб розрахунку індексу пульсації, а також бюджет невизначеності результатів вимірювання, що враховують невизначеність результатів вимірювання обумовленою зміною швидкості потоку під час вимірювання.

Керівник ІТД С.Л. Грабов

0063569

Акціонерне товариство «ФАРМАК» | 04080, Україна, м. Київ, вул. Кирилівська, 63
тел.: +38 (044) 239-19-40 | +38 (044) 496-87-87
e-mail: farmak@farmak.ua | www.farmak.ua

Ми робимо доступним лікування сучасними, якісними та ефективними лікарськими препаратами!