

АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО КЕРУВАННЯ

**© Канюк Г.І., Мезеря А.Ю., Чеботарьов А.М., Василюк Т.Ю.,
Фурсова Т.М., Канюк М.Г.**

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Канюк Геннадій Іванович (Kaniuk Gennadii): ORCID: 0000-0003-1399-9039; доктор технічних наук; завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мезеря Андрій Юрійович (Mezeria Andrii): ORCID: 0000-0003-2946-9593; mezzera@ukr.net ; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Чеботарьов Антон Миколайович (Chebotarev Anton): ORCID: 0000-0003-4279-1392; chebotaryov.an@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Василюк Тетяна Юхимівна (Vasylets Tetiana): ORCID: 0000-0002-2148-8645; vasylets.ty@upr.edu.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Фурсова Тетяна Миколаївна (Fursova Tetiana): ORCID: 0000-0003-1900-7432; tatiana2507@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Канюк Максим Геннадійович (Kaniuk Maksym): ORCID: 0009-0005-6724-8726; maksym.kaniuk@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Вимірювання гідравлічних параметрів технологічних процесів (витрати рідини, напору та тиску) є одним із способів досягнення енергетичної ефективності в різних галузях промисловості, у тому числі на теплових, атомних та гідравлічних електростанціях при автоматизованому керуванні енергоблоками та окремими силовими установками (насоси, турбіни, теплообмінники та інше). Метою досліджень є аналіз метрологічних характеристик засобів вимірювання гідравлічних параметрів для завдань енергозберігаючого керування обладнанням теплових, атомних та гідравлічних електростанцій та визначення методів та засобів вимірювання, що дозволяють забезпечити практичну реалізацію принципів енергозберігаючого керування. Серед великої кількості методів вимірювання витрати особливе місце займають системи вимірювання витрати на базі змінного перепаду тиску. У статті показані основні напрямки, в рамках яких ведуться дослідження щодо покращення та підвищення ефективності методів вимірювання витрати рідини. Проведено аналіз кількісного розподілу методу змінного перепаду тисків та вимірвальних систем на його основі, розглянуто та проаналізовано ринок розподілу витратомірних систем. Діяльність показано, частка поширення традиційних технологій вимірювання витрати займає половину всього парку витратомірних засобів і систем. Проведено аналіз методів вимірювання витрати рідини та тиску (напору) та визначено методи, які є найбільш перспективними для застосування у завданнях енергозберігаючого керування установками електростанцій. Проведено короткий аналіз парку вітчизняних та зарубіжних витратомірів різного типу, наведено основні метрологічні характеристики засобів вимірювання. Зроблено висновок щодо доцільності застосування різних типів

вимірвальних систем в інформаційно-вимірвальних комплексах автоматизованих систем керування енергоблоками електростанцій.

Ключові слова: вимірювання, методи вимірювання витрати рідини, методи вимірювання тиску і напору.

Kaniuk G.I., Mezerya A.Y., Chebotarev A.M., Vasilets T.Y., Fursova T.M., Kaniuk M.G.
Analysis of metrological characteristics of tools for measuring hydraulic parameters of power plants for energy-saving control.

Measurement of hydraulic parameters of technological processes (fluid flow and pressure) is one of the ways to achieve energy efficiency in various industries, including thermal, nuclear and hydraulic power plants with automated control of power units and individual power plants (pumps, turbines, heat exchangers and other). The aim of the research is to analyze the metrological characteristics of means for measuring hydraulic parameters for the tasks of energy-saving control of equipment of thermal, nuclear and hydraulic power plants and to determine the methods and means of measurement that allow providing practical implementation of the principles of energy-saving management. Among the large number of flow measurement methods, a special place is occupied by flow measurement systems based on variable pressure drop. The article shows the main directions in which research is being carried out to improve and increase the efficiency of methods for measuring fluid flow. A quantitative analysis was conducted to examine the distribution of the variable pressure drop method and the corresponding measuring systems. The study focused on evaluating the market for flow measuring systems, specifically analyzing its distribution patterns.

This research investigates the distribution of traditional flow measurement technologies within the fleet of flow meters and systems, comprising approximately half of the total. A comprehensive analysis of fluid flow and pressure measurement methods is conducted, with a focus on identifying the most promising methods for application in energy-saving control of power plant installations.

The study includes a concise evaluation of domestic and foreign flow meters of various types, highlighting their main metrological characteristics. The conclusion is made about the expediency of using various types of measuring systems in information-measuring complexes of automated control systems for power units at power plants.

Keywords: measurement, liquid flow measurement methods, pressure measurement methods.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

При проведенні натурних та модельних приймально-здавальних випробувань основного обладнання електростанцій [1], а також у процесі експлуатації для завдань керування [2] та діагностики [3] виникає необхідність вимірювання тиску, напору та витрати рідини, точність визначення яких залежить як від методів вимірювання даних величин, так й від використовуваних засобів виміру (ЗВ).

Основне завдання систем автоматизованого керування (АСК) є енергозбереження. Оскільки йдеться про частках відсотка в прирості коефіцієнта корисної дії (ККД), то на інформаційно-вимірвальні комплекси систем АСК накладаються високі вимоги щодо точності вимірювання технологічних параметрів з метою гарантованого виявлення цього незначного приросту та можливості підтримки оптимального режиму роботи. Так, наприклад, Міжнародна Електротехнічна Комісія (МЕК) при проведенні модельних приймально-здавальних випробувань гідравлічних турбін рекомендує вимірювати витрату води з похибкою не більше $\pm(0,3\div 0,5)$ % [1]. Проте вже зараз у практиці випробувань моделей гідротурбін вважається бажаним, щоб ця похибка не перевищувала $\pm(0,1\div 0,2)$ %. При цьому значення робочих витрат під час випробувань досягають $10 \text{ м}^3/\text{с}$. Необхідні

похибки та динамічний діапазон вимірюваних потоків рідини відповідає метрологічних характеристик робочих еталонів витрати рідини за ДСТУ 4403:2005 [4]. Подібні вимоги щодо точності виміру бажані і для систем енергозберігаючого керування у всьому діапазоні нормальної експлуатації обладнання [2].

Така висока точність вимірювань вимагає аналізу метрологічних характеристик засобів вимірювання гідравлічних параметрів, що є одними з основних технологічних параметрів теплових, атомних і гідравлічних електростанцій та значною мірою визначають ефективність роботи енергоблоків.

Характерними рисами вимірювань у реальних умовах електростанцій є: можливий динамічний характер досліджуваного параметра; використання при випробуванні трубопроводів великих діаметрів ($D_y=300$ мм та більше); нерівномірний розподіл епюри швидкостей перерізу потоку; вплив показань ЗВ від зовнішніх факторів (температура, тиск тощо); висока вимога до точності вимірювання параметра та ін.

Відповідно до вищесказаного, методи вимірювання напору і витрати рідини повинні забезпечувати необхідну якість вимірювань, а ЗВ повинні мати відповідні метрологічні характеристики, що дозволяють використовувати даний ЗВ в умовах експлуатації з метою отримання необхідної точності.

Аналізу основних існуючих методів вимірювання напору та витрати рідини, номенклатури вітчизняних та світових виробників, що випускаються ЗВ, а також теоретичному обґрунтуванню застосування методів та засобів вимірювання вищевказаних параметрів в умовах експлуатації електростанцій присвячена справжня робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відповідно до даних опитувань [5], які проводилися компаніями Flow Research та Ducker Worldwide, найпоширенішим методом вимірювання витрати є метод змінного перепаду тиску. У рамках цієї роботи було опитано та досліджено велику кількість найпередовіших компаній світу на всіх континентах (близько 300 компаній). Також відповідно до роботи [6] частка систем вимірювання та приладів, заснованих на традиційних технологіях вимірювання витрат речовин, становить близько 50 % всього світового парку витратомірних систем. У роботі [5] говориться, що за результатами опитування системи вимірювання, що ґрунтуються на змінному перепаді тиску, становлять майже одну третину (27,2 %) усіх методів вимірювання витрати.

Все це є свідченням того, що метод змінного перепаду тиску є домінуючим способом вимірювання витрати, особливо при вимірі великих потоків речовини на великих трубах діаметру відповідно до рекомендації [7].

Одним із методів підвищення точності аналізованих систем є підвищення точності вимірвальних перетворювачів фізичних величин, що входять до складу систем як канали та елементи. Значне підвищення класів точності перетворювачів перепаду тиску, тиску та температури, безсумнівно, призведе до підвищення точності всієї системи вимірювання витрати та кількості речовин.

Крім конструктивних рішень та модернізації головних складових елементів систем вимірювання витрати та кількості речовин, які не зазнали значних змін за останні роки, суттєво покращувалися способи визначення та методи уточнення різних коефіцієнтів, що входять до складу функції перетворення, що сприяло зменшенню похибки витрати.

Одним з важливих параметрів, що лежить в основі методу, є так званий коефіцієнт закінчення звужуючого пристрою (ЗП), що представляє собою відношення дійсного значення витрати, що протікає через ЗП, до відповідного значення, розрахованого згідно з теоретичною моделлю витрати через цей же пристрій.

Відповідно до робіт [9, 10] пропонується переглянути концепцію обчислення коефіцієнтів закінчення звужуючих пристроїв, відмовившись від залежності від числа

Рейнольдса. У роботі [9] пропонується альтернативне рівняння, що залежить тільки від перепаду тиску для даного коефіцієнта, який безперервно вимірюється системою. Це дозволить відмовитись від визначення коефіцієнта закінчення методом численних ітерацій, що значно прискорить процес обчислення, значно скоротить пам'ять програм, що реалізують алгоритм вимірювання витрати, спростить сприйняття даних параметрів. Пропоноване рівняння для коефіцієнта виглядає так:

Крім досліджень щодо уточнення самих коефіцієнтів закінчення і розширення ЗП, були проведені експерименти з оцінки впливу температури та різних впливів потоку, що обурюють, на процес вимірювання витрати [11].

Результати роботи [11] показали, що температура в діапазоні від 20 до 85°C абсолютно не впливає на вихідні коефіцієнти закінчення, тим самим унеможливується вплив цієї величини на коефіцієнт закінчення.

Не залишаються осторонь роботи з вивчення ділянок стабілізації для витратомірів, обумовлені структурою потоку і впливом шорсткості трубопроводів. Результати цих досліджень відбиваються як і роботах [8, 11], і у роботах типу [12, 13].

Одним із напрямів удосконалення методу є також захист від недостовірних вимірів та спотворень вимірюваної інформації. У цьому напрямку ведуться роботи зі створення маніфольдів та вентиляльних блоків, які виключають умисне викривлення даних. Наприклад, у роботі [14] повідомляється про створення безвентильних блоків, які забезпечують суворе виконання порядку включення чи відключення вентилів для відбору тиску до і після звужуючого устрою одну дію.

Все це показує, що найбільш традиційний та апробований метод вимірювання витрати рідин не вичерпав можливостей щодо підвищення точності та надійності. Активно ведуться дослідження, які б поліпшенню методу як у рівні моделювання величин, які входять у функцію перетворення системи, і лише на рівні підвищення надійності апаратної частини.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою досліджень є аналіз метрологічних характеристик засобів виміру гідравлічних параметрів (витрата рідини, тиск, напір) для завдань енергозберігаючого керування обладнанням теплових, атомних та гідравлічних електростанцій (нагнітачі, теплообмінники, турбіни, котли та інше) та визначення методів та засобів вимірювання, які дозволяють забезпечити практичну реалізацію принципів енергозберігаючого керування.

Виклад основного матеріалу

Номенклатура витратомірної техніки досить велика, а точність вимірювання саме цього показника грає вирішальну роль при проведенні модельних випробувань, тому слід зупинитися, в першу чергу, на основних метрологічних принципах вимірювання саме цього параметра.

Існує багато різних ознак, якими можна класифікувати ЗВ витрати рідини: за класом точності; діапазонів вимірів; виду вихідного сигналу; динамічними характеристиками тощо. Однак найбільш загальною є класифікація за принципами вимірювань, за тими фізичними явищами, за допомогою яких вимірювана величина перетворюється на вихідний сигнал первинного перетворювача витратоміра.

За принципом вимірювання витратоміри класифікують за такими основними групами (зазначений для кожної класифікаційної групи витратомірів принцип перетворення відноситься до їх первинних перетворювачів - датчиків):

- витратоміри змінного перепаду тиску (з пристроями, що звужують, з гідравлічними опорами, відцентрові, з напірними пристроями, струменеві);
- витратоміри обтікання (витратоміри постійного перепаду – ротаметри, поплавкові, поршневі, гідродинамічні), що перетворюють швидкісний натиск у переміщення тіла, що обтікає;

- тахіметричні витратоміри (турбінні з аксіальною або тангенціальною турбіною, кулькові), що перетворюють швидкість потоку в кутову швидкість обертання обтічного елемента (лопат турбінки або кульки);
- електромагнітні витратоміри, що перетворюють швидкість рухомої в магнітному полі провідної рідини в ЕРС;
- ультразвукові витратоміри, засновані на ефекті захоплення звукових коливань середовищем, що рухається;
- інерційні витратоміри (турбосилові, коріолісові, гігроскопічні), засновані на інерційному впливі маси рідини, що рухається з лінійним або кутовим прискоренням;
- теплові витратоміри (калориметричні, термоанемометричні), засновані на ефекті перенесення тепла середовищем, що рухається, від нагрітого тіла;
- оптичні витратоміри, засновані на ефекті захоплення світла рухомим середовищем (Фізо-Френелі) або розсіювання світла частинками, що рухаються (Допплера);
- меточні витратоміри (з тепловими, іонізаційними, магнітними, концентраційними, турбулентними мітками), засновані на вимірюванні швидкості або стані мітки при проходженні її між двома фіксованими перерізами потоку.

Класифікацію методів вимірювання витрати, для наочності, можна як схеми на рис.1, а методи виміру тиску – на рис.2.

З рекомендованих МЕК витратомірів найбільше застосування знайшли витратоміри змінного перепаду тисків та водозливи з тонкою стінкою. Дуже перспективними є електромагнітні, акустичні та коріолісові витратоміри. Ці прилади, в принципі, при індивідуальному градуюванні здатні забезпечити необхідні точності вимірювання витрати рідини в трубопроводах електростанцій.

Застосування витратомірів інших типів обмежене різними факторами. Сюди відносяться, в першу чергу, висока точність, великі значення витрати рідини, що протікає в трубопроводах більшості установок електростанцій, високі динамічні показники потоку рідини та ін.

Отже, варто зупинитися на витратомірах змінного перепаду тисків, електромагнітних, акустичних і коріолісових витратомірах.

Метод змінного перепаду тиску один із найбільш старих та вивчених методів вимірювання витрати. Це, а також можливість непрямого градуювання та перевірки стандартизованих первинних перетворювачів – звукуючих пристроїв, що реалізують метод, їх простота та надійність, серійний випуск вторинних перетворювачів – дифманометрів зумовило його надзвичайно широке (переважно порівняно з іншими) використання у практиці промислових вимірів витрати.

І водночас основу цього суто гідродинамічного методу лежать настільки складні фізичні процеси деформації потоків, настільки багато неконтрольованих чинників впливає характер цих процесів, що його нині обмежено, хоча можливості його «метрологічного вдосконалення» далеко ще не вичерпані [15].

Електромагнітні витратоміри малоінерційні в порівнянні з витратомірами інших типів і практично незамінні в тих процесах автоматичного регулювання, де запізнення відіграє істотну роль, або при вимірі витрат, що швидко змінюються.

На показання електромагнітних витратомірів не впливають зважені в рідині частинки та бульбашки газу, осесиметрична (а в каналах спеціальної форми будь-яка) зміна профілю розподілу швидкостей потоку, а також фізико-хімічні властивості рідини, що вимірюється (в'язкість, щільність, температура тощо), якщо вони не змінюють її електропровідність [16].

Зазначені переваги та забезпечили досить широке поширення електромагнітних витратомірів, незважаючи на їхню відносну конструктивну складність та необхідність ретельного щоденного технічного догляду.

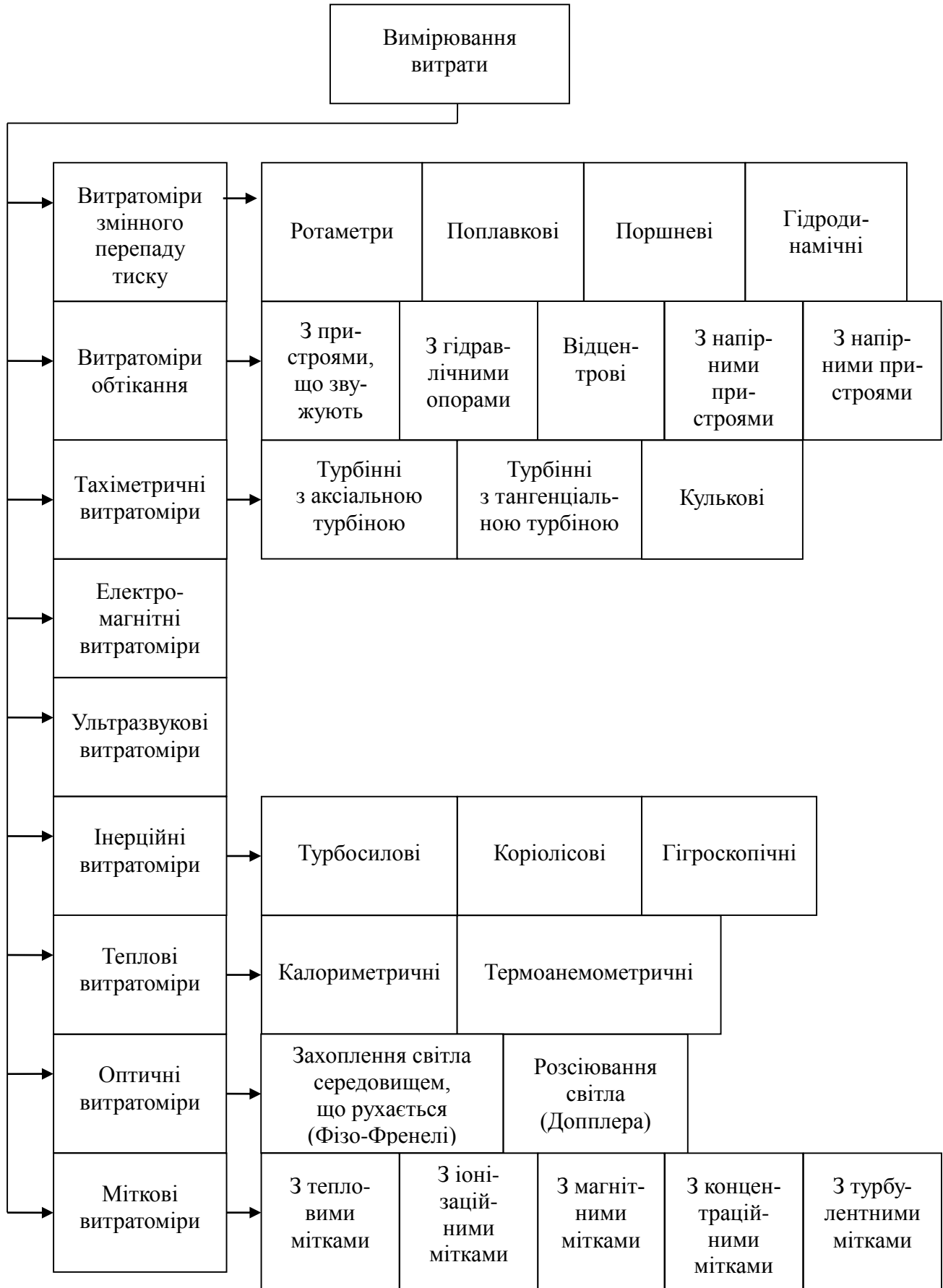
**Рис. 1** – Класифікація витратомірів за принципом виміру



Рис. 2 – Методи вимірювання тиску (напору)

До основних факторів, що впливають на точність ультразвукових витратомірів можна віднести мінливість або неточність визначення товщини стінок трубопроводу, швидкості звуку в призмах, стінках трубопроводу і воді, епюри швидкостей води [17].

Незважаючи на це, ультразвукові витратоміри все ширше застосовують у нафтохімічній, харчовій та інших галузях промисловості, при гідравлічних дослідженнях та експлуатації обладнання.

Перевагами їх є: можливість безконтактного вимірювання будь-яких середовищ, у тому числі і неелектропровідних; досить висока точність приладів при їхньому індивідуаль-

ному градуюванні та використанні спеціальних засобів автокомпенсації найбільш істотних перешкод; висока надійність чутливих елементів (випромінювачів та приймачів ультразвукових коливань); висока швидкодія, що дозволяє вимірювати пульсуючі витрати з частотою пульсацій до 10 кГц.

Для вимірювання тиску в установках закритого типу застосовуються диференціальні датчики тиску. Відбір тиску здійснюється з верхнього та нижнього рівня установки. У відкритих ємностях вимір напору здійснюється рівнемірами поплавкового або акустичного типів.

На вибір ЗВ, що задовольняють усім вимогам точності вимірювань, впливають не тільки вищевикладені фактори, але й такі, як фірма-виробник, вартість ЗВ, гарантії виробника, а також номенклатура продукції, що випускається.

Зростання інтересу вітчизняних виробників вимірвальної техніки до внутрішніх потреб ринку призвело до появи широкої номенклатури ЗВ, що випускаються в Україні, а також розвиток міжнародного співробітництва, зокрема у галузі метрології та вимірвальної техніки, активну участь України в цьому процесі створили передумови для появи на її ринку сучасних зарубіжних засобів виміру.

Основними вітчизняними виробниками витратомірної техніки є: Сафір [18], НВП «Водомір» [19], НВП Ергомера [20].

Серед зарубіжних виробників можна відзначити такі відомі фірми як Krohne [21], Druck [22], Fisher-Rosemount Ltd. [23], PROline [24] та ін.

Основні метрологічні характеристики ЗВ показані у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики засобів вимірювання витрати рідини

Фірма виробник	Тип	Діапазон вимірювань	Діаметр трубопроводу D_y , мм	Клас точності	Приєднання	Температурний діапазон, °C
1	2	3	4	5	6	7
Електромагнітні витратоміри						
Krohne		$3 \cdot 10^{-5}$ - 27,8 м ³ /с	2,5-3000	0,3-0,5	Фланцеве, міжфланцеве.	-25 ÷ 140
PROline	Promag 50/53 P	$2 \cdot 10^{-4}$ -11,3 м ³ /с	15-600	0,2-0,5	Фланцеве, міжфланцеве.	-25 ÷ 150
НВП «Водомір»	ЕРСВ-020		10-200	0,5	Фланцеве	-10 ÷ 150
НВП ЕргоМіра	СКМ-1	0,1-320	20-150	0,5	Фланцеве	-25 ÷ 150
Ультразвукові витратоміри						
Krohne		$3 \cdot 10^{-4}$ -125 м ³ /с	25-3000	0,5	Фланцеве, зовнішнє	-50 ÷ 150
НВП «Водомір»	ІРКА	$5 \cdot 10^{-4}$ -200 м ³ /с	40-5000	0,5-1	Зовнішнє	-25 ÷ 55
НВП ЕргоМіра	Ергомера-125.01	$7,8 \cdot 10^{-4}$ -35 м ³ /с	50-5000	0,5-1	Врізний, накладний	-15 ÷ 150
Вихрові витратоміри						
Krohne	VFM 3100 FT	$8 \cdot 10^{-4}$ -0,5 м ³ /с	15-300	0,2-0,5	Фланцеве, міжфланцеве	-20 ÷ 430

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Диференціальні датчики тиску						
Krohne		Від 0...0,6 мбар до – 1...25 мбар	-	0,1	Врізний	-40 ÷ 180
Druck	DPI 615	0.007-70 МПа	-	0,1	Врізний	-10 ÷ 40
Сафір	Сафір-М	0-10 бар	-	0,15-0,4	Врізний	-30 ÷ 80
АТ НДІРА	Квант ДД1/5	0,06 кПа -16 МПа	-	0,25	Врізний	-10 ÷ 50
Fisher-Rosemount Ltd.	3095 MV	0-248 кПа	-	0,2	Врізний	-40 ÷ 85
Масові витратоміри						
Krohne		$2,5 \cdot 10^{-4}$ -360 т/год	10-100	0,15	Фланцеве	-25 ÷ 130
PROline	Promass 80/83	70 т/год	8-100	0,15/0,2	Фланцеве	-25 ÷ 150

Висновки

Серед електромагнітних витратомірів можна відзначити витратоміри фірми Krohne та PROline, які відповідають усім метрологічним вимогам.

Ультразвукові витратоміри мають схожі метрологічні властивості і можна розглядати як рівноцінні. Вибір ультразвукових ЗВ повинен визначатися способом градування конкретного ЗВ та вартісними показниками.

Вихрові (каріолісові) витратоміри фірми Krohne, незважаючи на їх хороші точнісні показники, застосовуються для вимірювання малих витрат, що обмежує їх використання для автоматизованого керування при великих витратах рідини.

Диференціальні датчики тиску як вітчизняних, так і зарубіжних виробників відрізняються високим класом точності та широким діапазоном вимірюваних тисків.

Представлені ЗВ внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки, допущених до застосування в Україні, метрологічно забезпечені, за своїми характеристиками можуть використовуватись як основні або перевіірочні засоби вимірювання напору, тиску та витрати рідини в інформаційно-вимірювальних комплексах систем автоматизованого керування енергоблоками теплових, атомних та гідравлічних електростанцій.

Список використаних джерел:

1. МЭК 60193: Модельные приёмо-сдаточные испытания гидравлических турбин, насосов гидроаккумулирующих станций и насос-турбин. – Изд. 2. – 1999. – 567 с.
2. Канюк Г. И. Методы и модели энергосберегающего управления энергетическими установками электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук. – Харьков : Точка, 2016. – 332 с.
3. Уніфікація методів технічної діагностики трубопровідних систем з метою забезпечення безпечної експлуатації / Г. С. Грінченко, С. М. Артюх, В. В. Грінченко, С. С. Негодов // *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 29. – С. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>
4. ДСТУ 4403:2005 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'ємної та масової витрати рідини й об'єму та маси рідини, що протікає по трубопроводу. – Режим доступу : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60249. (дата звернення 15.04.2023).
5. Yoder J. Go New-Tech or Stick with DP meters? Differential pressure flow users face the dilemma / J. Yoder // *Control Magazine*. – 2001. – Vol. 1. – P. 1–6.

6. Yoder J. Measuring a 1 % gain in a 4,5 billion dollars market / J. Yoder // *Flow Control*. – 2008. – Vol. 6. – P. 42–45.
7. МИ 3082-2007. Выбор методов и средств измерений расхода и количества потребляемого природного газа в зависимости от условий эксплуатации на узлах учета. Рекомендации ФГУП ВНИИР. – Казань : ВНИИР, 2007. – 39 с.
8. Пистун Е. П. Уточнение коэффициента истечения стандартных диафрагм расходомеров переменного перепада давления / Е. П. Пистун, Л. В. Лесовой // *Датчики и системы*. – 2005. – № 5. – С. 14–16.
9. An alternative formulation of the standard orifice equation for natural gas / D. E. Cristancho, K. R. Hall, L. A. Coy, G. A. Iglesias-Silva // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2010. – Vol. 21. – P. 299–301.
10. A formulation for the flow rate of a fluid passing through an orifice plate from the First Law of Thermodynamic / M. A. Gomez-Osorio, D. O. Ortiz-Vega, I. D. Mantilla, H. Y. Acosta, J. C. Holste, K. R. Hall, G. A. Iglesias-Silva // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2013. – Vol. 33. – P. 197–201.
11. Buker O. Reynolds number dependence of an orifice plate / O. Buker, P. Lau, K. Tawackoli- an // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2013. – Vol. 30. – P. 123–132.
12. Nadeem M. Turbulent boundary layers over sparsely-spaced rod-roughened walls / M. Nadeem, H. J. Lee, J. Lee, H. J. Sung // *International Journal of Head and Fluid Flow*. – 2015. – Vol. 56. – P. 16–27.
13. De Marchis M. Numerical observations of turbulence structure modification in channel flow over 2D and 3D rough walls / M. De Marchis, B. Milici, E. Napoli // *International Journal of Head and Fluid Flow*. – 2015. – Vol. 56. – P. 108–123.
14. Пистун Е. П. Применение безвентильных блоков подсоединения дифманометров для устранения возможности искажения результатов измерений при учете энергоносителей / Е. П. Пистун, Р. Я. Дубиль // *Коммерческий учет энергоносителей*. – СПб. : Политехника, 2001. – С. 350–354.
15. Лепявко А. П. Средства измерений расхода жидкости и газа / А. П. Лепявко. – М. : АСМС, 2015. – 252 с.
16. Білінський Й. Й. Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та їхня класифікація / Й. Й. Білінський, М. О. Стасюк, М. В. Гладішевський // *Автоматика та інформаційно-вимірвальна техніка. Наукові праці ВНТУ*. – 2015. – № 1. – С. 1–11.
17. Народницький Г. Ю. О погрешности измерения расхода воды ультразвуковым накладным времяимпульсным расходомером Г. Ю. Народницький // *Украинский метрологический журнал*. – 2000. – Вып. 3. – С. 49–52.
18. Сафир, Сафир М. – датчики давления. – Режим доступа : <http://manometr.net.ua/Преобразователи-давления/Сафир-Сафир-М-датчики-давления.html?pop=0> (дата звернення 03.05.2023).
19. Водомер : сайт. – Режим доступа : www.vodomer.com.ua (дата звернення 23.04.2023).
20. Научно-производственное предприятие «Эргомера» : сайт. – Режим доступа : <http://www.ergomera.dp.ua> (дата звернення 10.05.2023).
21. Krohne. – Access mode : <https://ua.krohne.com/en/products/flow-measurement/flowmeters> . (Last accesses 11.05.2023).
22. Shanghai cixi Instrument CO., LTD. – Access mode : https://www.cxfloimeter.com/products/list_34_1.html?gclid=CjwKCAjwgqejBhBAEiwAuWHioLVZS2BJGxtopnOyJrrCG_b9arbFR5mR5mKZv4USjM38m97tQLIVMBoCy0UQAvD_BwE . (Last accesses 15.05.2023).
23. Emerson. – Access mode : <https://www.emerson.com/en-us/automation/rosemount> . (Last accesses 11.05.2023).
24. Endress+Hauser. – Access mode : www.endress.com . (Last accesses 11.05.2023).

Reference

1. Mezhdunarodna elektrotekhnichna komisiia, 1999. 60193 Modelnie pryëmo-sdatochnie yspitanyia hydraulycheskykh turbyn, nasosov hydroakkumulyruiushchykh stantsiyi y nasos-turbyn, [*Model acceptance tests of hydraulic turbines, pumps of pumping stations and pump-turbines*].
2. Kaniuk, HI, Mezeria, AYu & Suk, YV 2016, *Metodi i modeli enerhosberehaiushcheho upravleniya enerhetycheskymy ustanovkamy elektrostantsiyi*, [*Methods and models for energy-saving control of power plants*], Tochka, Kharkov.
3. Hrinchenko, HS, Artiukh, SM, Hrinchenko, VV & Nehodov, SS, 2022, ‘Unifikatsiia metodiv tekhnichnoi diahnostryky truboprovodnykh system z metoiu zabezpechennia bezpechnoi ekspluatatsii’, [*Unification of methods for technical diagnostics of pipeline systems to ensure safe exploitation*], *Mashynobuduvannia*, iss. 29, Pp. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>
4. Nacional'nyj nauchnyj centr «Institut metrologii», 2005. DSTU 4403:2005 Metrolohiia. Derzhavna povirochna skhema dlia zasobiv vymiriuvannia ob'iemnoi ta masovoi vytraty ridyny y ob'iemu ta masy ridyny, shcho protikaie po truboprovodu, [*Metrology. State verification scheme for means of measuring the volume and mass flow rate of a liquid and the volume as well as mass of a liquid flowing through a pipeline*].
5. Yoder, J 2001, ‘Go New-Tech or Stick with DP meters? Differential pressure flow users face the dilemma’ *Control Magazine*, Vol. 1, Pp. 1–6.
6. Yoder, J 2008, ‘Measuring a 1 % gain in a 4,5 billion dollars market’ *Flow Control*, Vol. 6, Pp. 42–45.

7. Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut rashodometrii, 2007. MI 3082-2007 Vybor metodov i sredstv izmerenij rashoda i kolichestva potrebljaemogo prirodnoho gaza v zavisimosti ot uslovij jekspluatatsii na uzlah ucheta, [*Selecting methods and means for measuring the flow rate and quantity of consumed natural gas depending on the operating conditions at metering units. Recommendations of FGUP VNIIR*], Kazan' : VNIIR.
8. Pistun, EP & Lesovoj, LV 2010, 'Utochnenie koeficienta istechenija standartnyh diafragm rashodomerov peremennogo perepada davlenija', [*Clarification of the flow coefficient for standard variable differential pressure flowmeter diaphragms*], *Datchiki i sistemy*, no 5, Pp. 14–16.
9. Cristancho, DE, Hall, KR, Coy, LA & Iglesias-Silva, GA 2010, 'An alternative formulation of the standard orifice equation for natural gas' *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 21, Pp. 299–301.
10. Gomez-Osorio, MA, Ortiz-Vega, DO, Mantilla, ID, Acosta, HY, Holste, JC, Hall, KR & Iglesias-Silva, GA 2013, 'A formulation for the flow rate of a fluid passing through an orifice plate from the First Law of Thermodynamic' *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 33, Pp. 197–201.
11. Buker, O, Lau, P & Tawackolian, K 2013, 'Reynolds number dependence of an orifice plate' *Flow Measurement and Instrumentation*. Vol. 30, Pp. 123–132.
12. Nadeem, M, Lee, HJ, Lee, J & Sung, HJ 2015, 'Turbulent boundary layers over sparsely-spaced rod-roughened walls' *International Journal of Head and Fluid Flow*, Vol. 56, Pp. 16–27.
13. De Marchis, M, Milici, B & Napoli, E, 2015, 'Numerical observations of turbulence structure modification in channel flow over 2D and 3D rough walls' *International Journal of Head and Fluid Flow*, Vol. 56, Pp. 108–123.
14. Pistun, EP & Dubil', RJ 2001, 'Primenenie bezventil'nyh blokov podsoedinenija difmanometrov dlja ustranjenja vozmozhnosti iskazhenija rezul'tatov izmerenij pri uchete jenergonositelej', [*Application of valve-less connection blocks of diphmanometers to eliminate the possibility of distortion of measurement results in energy consumption metering*], in *Kommercheskij uchet jenergonositelej*, Politehnika, SPb., S. 350–354.
15. Lepjavko, AP 2015, *Sredstva izmerenij rashoda zhidkosti i gaza*, [*Liquid and gas flow measurement instruments*], ASMS, Moskva, 252 s.
16. Bilynskiy, YY, Stasiuk, MO & Hladyshevskiy, MV 2015, 'Analiz metodiv i zasobiv kontroliu vytrat ridkykh i hazopodibnykh seredovyshch ta yikhnia klasyfikatsiia', [*Analysis of methods and means for controlling the flow of liquid and gaseous media and their classification*], *Avtomatyka ta informatsiino-vymiriuvalna tekhnika. Naukovi pratsi VNTU*, no 1. S. 1–11.
17. Narodnickij, GJu 2000, 'O pogreshnosti izmerenija rashoda vody ul'trazvukovym nakladnym vremjaimpul'snym rashodomerom', [*On the error of measuring water flow by the ultrasonic clamp-on time-pulse flowmeter by G. Y. Narodnitsky*], *Ukrainskij metrologicheskij zhurnal*, iss. 3, Pp. 49–52.
18. Safir, Safir M. – datchiki davlenija, [*pressure sensors*], nd., viewed 03 May 2023, <<http://manometr.net.ua/Preobrazovateli-davlenija/Safir-Safir-M-datchiki-davlenija.html?pop=0>>
19. Vodomer , [*Water gauge*], nd, viewed 24 April 2023, <www.vodomer.com.ua>.
20. Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie «Jergomera», [*Research and Production Enterprise "Ergomera"*], nd., viewed 10 May 2023, <<http://www.ergomera.dp.ua>> .
21. Krohne, nd., viewed 11 May 2023, <<https://ua.krohne.com/en/products/flow-measurement/flowmeters>>.
22. Shanghai cixi Instrument CO., LTD, nd., viewed 15 May 2023, <https://www.cxflowmeter.com/products/list_34_1.html?gclid=CjwKCAjwgqejBhBAEiwAuWHioLVZS2BJGxtopnOyJrrCG_b9arbFR5mR5mKZv4USjM38m97tQLiVMBocY0UQAavD_BwE>.
23. Emerson, nd., viewed 11 May 202, <<https://www.emerson.com/en-us/automation/rosemount>>.
24. Endress+Hauser, nd., viewed 11 May 2023, <www.endress.com>.

Стаття надійшла до редакції 24 травня 2023 року