
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК: 622.691.2

А. А. СТЕЦЕНКО

СУЧАСНА КЛАСИФІКАЦІЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ВИТРАТИ ГАЗУ

*Вінницький національний технічний університет, 21021, Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, Україна*

Анотація: У роботі запропоновано нову класифікацію ультразвукових ІВС витрати газу, яка охоплює методи вимірювання, особливості побудови та етапи розвитку. Витратоміри пройшли три етапи за сорок років свого існування й на сьогодні перебувають на четвертому етапі свого розвитку. Кожне нове покоління вносило більш складні алгоритми обробки вимірювальної інформації та більш ефективні способи підключення до цифрових систем. Сучасні ультразвукові ІВС не мають рухомих частин, працюють з малими гідравлічними втратами в широкому динамічному діапазоні. Проте необхідна точність ультразвукових витратомірів суттєво залежить від параметрів газового потоку, методів вимірювання, умов експлуатації тощо. У цьому випадку для проектування нових засобів необхідно виконати вибір багатьох складових ультразвукової ІВС витрати, але наявні класифікації, як правило, враховують лише окремі ознаки. При цьому недооцінюють рівень інтеграції, спосіб обробки даних і можливість системи до адаптації. Тому в нову класифікацію увійшли відомі та внесені нові ознаки, до яких можна віднести комбіновані або гібридні витратоміри, що поєднують кілька інформативних параметрів, нормативні документи, інформаційно-вимірювальні системи та інтелектуальні ІВС, сфери застосування тощо.

Ключові слова: ультразвуковий витратомір, інформаційно-вимірювальна система витрати газу, класифікація, класифікаційні ознаки, еволюція розвитку, стандарти, покоління витратомірів.

Abstract. This paper proposes a new classification of ultrasonic gas flow information and measurement systems (IMS), covering measurement methods, structural features, and stages of development. Over the forty years of their evolution, ultrasonic flowmeters have undergone three major stages and are currently at the fourth stage of development. Each new generation has introduced more advanced algorithms for measurement data processing as well as more efficient approaches to integration with digital systems. Modern ultrasonic IMS are characterized by the absence of moving parts, low hydraulic losses, and operation over a wide dynamic range. However, the required measurement accuracy significantly depends on gas flow parameters, measurement methods, operating conditions, and other factors. Therefore, the design of new systems requires the selection of numerous components and design features, while existing classifications typically consider only a limited set of characteristics. In particular, they often underestimate the level of system integration, data processing approaches, and adaptability of the system. To address these limitations, the proposed classification extends existing features and introduces new ones, including combined (hybrid) flowmeters that utilize multiple informative parameters, regulatory frameworks, information and measurement systems and intelligent IMS, as well as application domains.

Keywords: ultrasonic flowmeter, gas flow information and measurement system, classification, classification features, evolution, standards, flowmeter generations

10.31649/1681-7893-2026-51-1-278-286

ВСТУП

Ультразвукові витратоміри активно використовуються у водопостачанні, енергетиці, нафтогазовій галузі та хімічній промисловості. Вони вимірюють витрату рідких і газових середовищ, що проходять по трубах від малого до великого діаметра, коли простіші технології не дають необхідної точності.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Кожне нове покоління [1, 2] стає складнішим і водночас відбувається перехід від аналогових часово-імпульсних (TOF-пристроїв) до кіберфізичних сенсорів; від фіксованих цифрових фільтрів до адаптивних систем зі змінними параметрами і далі до інтелектуальних моделей, що використовують нейронні мережі та методи машинного навчання. У роботі [3], яка опублікована у 2010 роках представлена загальну класифікацію витратомірів для газу і рідин. Тоді ультразвукові витратоміри стояли в тіні інших засобів вимірювання. За півтора десятиліття все змінилося. Ультразвукові витратоміри стали головними засобами для вимірювання витрати у закритих потоках. Тепер їх називають ультразвуковими інформаційно-вимірювальними системами (ІВС) витрати.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛОГІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

У науковій літературі відсутній єдиний підхід до класифікації ультразвукових витратомірів, що зумовлено різноманітністю фізичних принципів, конструктивних рішень та умов застосування. Відсутність одного підходу зумовлена різними фізичними принципами, різними конструктивними рішеннями і різними умовами застосування ультразвукових витратомірів. Існуючі класифікації формувалися поступово по мірі удосконалення конструкцій, апаратного забезпечення засобів витрат і відображали погляди різних авторів на їх ключові ознаки. Так, L. C. Lynnnworth створив одну з перших загальних класифікацій, у якій головним критерієм був спосіб вимірювання [4]. Він розділив ультразвукові витратоміри на часові, доплерівські та інші типи. Це була основа для подальшого розвитку класифікацій. Проте в такому підході не були взяті до уваги конструктивні та експлуатаційні особливості засобів. У нових дослідженнях L. C. Lynnnworth і Y. Liu розширили класифікацію й додали до класифікації ознаки, що стосуються обробки сигналів і типи середовища. Додані ознаки допомогли частково врахувати практичні аспекти застосування. Проте класифікація залишилася орієнтованою в основному на фізичні принципи [5]. R. C. Vaker запропонував інженерний підхід [6]. У цьому підході, крім того, як працює пристрій, враховано будову і спосіб встановлення витратомірів (inline, insertion, clamp-on). Але така класифікація не охоплювала методи та алгоритми обробки сигналів. M. L. Sanderson і H. Yeung у класифікацію додали нові характеристики, які стосувалися форми звукових каналів і кількості шляхів вимірювання [7]. В роботах L. Xu і X. Gong. L. Xu і X. Gong було запропоновано багатокритеріальний підхід, який поєднував принцип вимірювання, спосіб обробки сигналу, тип середовища [8]. Класифікація вийшла досить складною та не могла бути універсальною. Сучасні промислові джерела, наприклад Endress+Hauser і Lanry Instruments спростили класифікації і будують її на таких ознаках: принцип дії, спосіб монтажу, застосування, кількість каналів [10, 11]. Ці підходи були орієнтовані на практичну роботу, але не дають достатнього узагальнення для наукових досліджень.

Аналіз підходів показує, що більшість авторів використовують прості або мало пов'язані ознаки, немає однієї ієрархічної структури класифікації, не беруться до уваги як фізичні, конструктивні і алгоритмічні аспекти впливають один на одного. Тут вартий уваги підхід Коробка О. В. [12]. Він запропонував створити одну загальну класифікацію ультразвукових витратомірів, враховуючи різні групи ознак. На відміну від інших авторів, у роботах класифікація враховує: принцип вимірювання, структури вимірювальної системи, параметри звукових каналів, способи обробки сигналів, умови експлуатації.

Отже, класифікації ультразвукових витратомірів почалися з простих – за принципом дії, а потім стали складними, використовуючи велику кількість критеріїв. Проте більшість цих класифікацій залишилися неповними.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ

Огляд наукових праць і нормативно-технічних документів свідчить, що існуючі підходи до класифікації ультразвукових витратомірів та ІВС здебільшого обмежуються окремими ознаками: принципом вимірювання, кількістю акустичних каналів або конструктивним виконанням первинних перетворювачів [13, 14]. При цьому часто не беруть до уваги такі суттєві моменти як наскільки ультразвукові ІВС поєднані, як обробляються дані вимірювань, чи можуть ультразвукові ІВС пристосовуватися до змінного потоку і які етапи розвитку мають ультразвукові витратоміри та ІВС. Тому важливо створити загальну класифікацію ультразвукових інформаційно-вимірювальних систем витрати природного газу, яка б інтегрувала якомога більше ознак як за прямими, та і за опосередкованими зв'язками. Це дозволить проектувати систему, яка в результаті вибору відповідної структури, програмного забезпечення та результатами експериментальних досліджень дає найвищі показники ефективності.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Швидкий розвиток ультразвукових витратомірів і інформаційних технологій вимагає нової класифікації, яка повинна стосуватися не лише окремих ультразвукових витратомірів, а й ультразвукових інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) у цілому. Така класифікація повинна виконувати дві ключові функції: упорядкувати існуючі рішення та визначати напрямки удосконалення вже розроблених і впроваджених ІВС за їхніми конструктивними, алгоритмічними та функціональними ознаками.

Таким чином, метою роботи є створення сучасної класифікації ультразвукових інформаційно-вимірювальних систем витрати природного газу, яка не лише відображає сучасний стан галузі, а й окреслює перспективні шляхи їх подальшого розвитку.

3. МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА КЛАСИФІКАЦІЇ

Особливістю ультразвукових систем вимірювання витрат природного газу є відсутність рухомих елементів, малі гідравлічні втрати, широкий динамічний діапазон та здатність до інтеграції з цифровими засобами обробки й передавання вимірювальної інформації. При цьому точність таких систем істотно залежить від параметрів газового потоку: профілю швидкості, ступеня турбулентності, наявності асиметрії і закрутки. Все це не дає підтримувати стабільні вимірювальні показники в реальних умовах експлуатації. На рисунку показана запропонована класифікація ІВС витрати газу.

В першу чергу необхідно розглянути методи вимірювання, а також інформативні параметри ультразвукових вимірювальних перетворювачів. Найчастіше вимірюють газову витрату за допомогою часо-імпульсного (TOF) методу. Метод працює на вимірюванні різниці часу, коли ультразвуковий сигнал рухається за потоком і коли рухається проти потоку. Ця різниця показує швидкість потоку [13 - 15]. Аналізуючи залежності, які описують такий принцип вимірювання, виявляється наскільки система чутлива в широкому діапазоні витрати і які складні ефекти мають місце при перехідному й турбулентному потоці.

Окрім часо-імпульсних (TOF), існує ряд витратомірів, що ґрунтуються на інших принципах. Ці витратоміри функціонують на вимірюванні фазових та частотних зсувів, належать до резонансних і кореляційних типів [16-19]. Фазові витратоміри вимірюють різницю фаз між сигналами, які йдуть за напрямком потоку і проти потоку. Вони чутливі до змін швидкості, добре працюють на високих частотах, але вимагають стабільного сигналу. Частотні (доплерівські) витратоміри базуються на ефекті Доплера – зміні частоти ультразвуку, коли сигнал відбивається від рухомих частинок у потоці. Зазвичай такі прилади використовують у середовищах з твердими частинками або з газовими бульбашками, але в чистих рідинах і газах вони менш точні. Резонансний витратомір працюють на зміні резонансної частоти акустичної системи залежно від швидкості потоку. Вони використовуються рідше й можуть бути ефективними для вимірювань у специфічних середовищах, але складніші в реалізації. Кореляційний метод аналізує випадкові коливання сигналу, що переноситься потоком, за допомогою статистики. Він ефективно працює в турбулентному потоці, не боїться шуму, проте потребує складної обробки сигналу [20-22].

Останнім часом в наукових статтях з'являються нові вимірювальні перетворювачі, які одночасно використовують декілька методів і, відповідно, кілька інформативних параметрів ультразвукового сигналу. Це дає змогу виконати так звані перехресні вимірювання. Тому такі витратоміри необхідно виділити в окрему групу. Ця група називається комбінованими або гібридними ультразвуковими витратомірами. Наприклад, гібридний часово-імпульсний ультразвуковий витратомір поєднує метод TOF і ультразвуковий імпульсний доплерівський метод (UDM). Метод TOF вимірює середню лінійну швидкість потоку. Ультразвуковий імпульсний доплерівський метод (UDM) дає дані про профіль швидкостей потоку [16, 17]. Технологічно існують і частково вже працюють промислові засоби TOF-фазові та TOF-кореляційні/резонансні ультразвукові витратоміри. Поєднання методів дозволяє вимірювати дуже повільні і швидкі потоки. Поєднання методів підвищує точність і надійність вимірювань у складних потоках – турбулентних, аерованих, з домішками. Але при цьому необхідні складні алгоритми обробки даних або машинне навчання.

Для ультразвукових витратомірів важливе значення має геометрія розташування променів ультразвукових перетворювачів. Вибір положення ультразвукового променя безпосередньо впливає на чутливість вимірювальної системи до асиметрії профілю швидкості потоку [4, 23, 24].

За розташуванням ультразвукового променя та напрямком потоку витратоміри поділяються на:

- витратоміри з розташуванням ультразвукових перетворювачів під кутом до потоку;
- витратоміри з паралельним напрямком променя відносно потоку;
- витратоміри з перпендикулярним напрямком променя до потоку.

**ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ
В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**



Рисунок 1 – Загальна класифікація ультразвукових ІВС

Витратоміри з кутовим розташуванням сенсорів діляться на безвідбивні і відбивні. У безвідбивних схемах ультразвукові перетворювачі одночасно передають і приймають сигнал. Відбивні схеми бувають однопрохідними або багатопрохідними. Багатопрохідні схеми підвищують точність,

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

особливо коли швидкість потоку мала. Такі схеми часто виглядають як V- або W-подібні, або як Дельта-схема. Однак багатопрохідні схеми збільшують розмір витратоміра і вимагають кращих відбивних поверхонь.

Ультразвукові витратоміри розташовують канали таким чином, що їх промені можуть бути хордовими або діаметральними [4, 21]. Хордові канали вимірюють швидкість по одній або кількох хордах у поперечному перерізі труби. Це дає змогу отримати середню швидкість загальну потоку. Діаметральні канали розташовуються по діаметру труби, тому вони показують детальний профіль швидкості. На практиці часто беруть багатоканальні змішані системи, які поєднують кілька хордових і діаметральних каналів. Такі системи підвищують точність, бо зменшують вплив асиметрії потоку. Вибір між хордовою та діаметральною схемою визначається вимогами до точності, діаметром трубопроводу та характером гідродинамічних умов.

З метою підвищення точності витрат ультразвукові витратоміри застосовують кілька каналів вимірювання. Тому вони мають один, два або декілька каналів (від 2-х до 8-и), а іноді і просторову (3D) схему. Одноканальний засіб простий і дешевий, але його точність часто недостатня, особливо, коли швидкість потоку несиметрична. Двоканальний засіб ефективніше враховує нерівномірність потоку, багатоканальний - вимірює з високою точністю витрату та має нижчу залежність від гідродинамічних збурень. Просторовий 3D-витратомір має багато каналів, і ультразвукові промені проходять через потік під різними кутами. У цьому випадку можна виміряти тривимірний профіль швидкостей у трубопроводі, враховувати асиметрію і турбулентність потоку, підвищити точність у складних режимах потоку [12, 25-27]. Коли збільшується кількість акустичних каналів, система стає менш чутливою до локальних спотворень швидкості, що і підтверджують експерименти. Але при цьому багатоканальні системи дорожчі і складніші в установці. Тому кількість каналів визначається умовами роботи, діаметром труби і необхідною точністю. На практиці існують засоби, які використовують різні схеми: одноканальні – для побутових і простих промислових задач, багатоканальні – для точних вимірювань витрати нафти та нафтопродуктів, газів, води тощо [25].

Витратоміри розрізняються за способом розташування ультразвукових сенсорів: внутрішні, зовнішні (clamp-on) і комбіновані. Кожна з цих конструкцій створюються для особливих умов роботи. Розташування сенсора впливає на акустичний зв'язок з потоком, змінюючи амплітуду та відношення сигнал-шум у всьому діапазоні витрати. Внутрішні сенсори монтують безпосередньо в стіну труби, і дають точне вимірювання, але при цьому необхідно втручатися в технологічний процес. Зовнішні (clamp-on) сенсори кріплять зовні труби і дозволяють виміряти витрату і проводити ремонт без зупинки і без порушення герметичності. Комбіновані конструкції поєднують переваги обох підходів [4, 19, 23, 25]. 3D конструкції відносяться до нових поколінь і дають більше можливостей порівняно зі старими часо-імпульсними і доплерівськими методами [28].

Будь-який сенсор повинен бути спроектований таким чином, щоб забезпечити високу точність вимірювань, безперешкодний доступ до трубопроводу, безвідмовну роботу та ремонтпридатність за умови безперервності технологічного процесу, а також високою рентабельністю. Тому за рівнем інтеграції ультразвукові витратоміри можна поділити на три групи: датчики (сенсори), інформаційно-вимірювальні системи та інтелектуальні ІВС.

Сенсори сприймають фізичну величини (в даному випадку швидкість потоку) та перетворюють її в електричний сигнал, зручний для передачі, обробки або відображення. Вони передають дані зовнішнім пристроям. ІВС поєднують сенсори з блоками обробки сигналу та дозволяють виконувати алгоритмічну корекцію результатів вимірювання, що підвищує точність. Розумні, тобто інтелектуальні ІВС інтегрують сенсори, обчислювальні модулі та програмне забезпечення, виконують багаторівневу обробку даних, включно з адаптивними алгоритмами, самодіагностику та працюють у складі автоматизованих систем керування технологічними процесами [19]. Отже, чим вища інтеграція, тим ширші можливості витратоміра: від простого сенсора до розумної системи, що дає точні та надійні виміри в реальному часі.

Ультразвукові витратоміри як було сказано вище використовуються у різних галузях. За сферою застосування їх можна поділити на чотири групи: комерційний облік, технічний контроль, лабораторні вимірювання і діагностика трубопроводів [28, 30]. Комерційний облік використовує витратоміри для точного вимірювання витрати енергоносіїв (газу, води, теплової енергії) і розрахунків між постачальниками та споживачами. Технологічний контроль застосовується у виробничих процесах для моніторингу параметрів потоку та забезпечення стабільності технології. Лабораторні вимірювання використовуються для досліджень, калібрування та перевірки точності різних методів вимірювання. Діагностика трубопроводів призначена для виявлення гідродинамічних збурень, асиметрії профілю швидкості та інших дефектів, що можуть впливати на ефективність транспортування [1, 2, 31].

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИБОРИ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Згідно зі світовими правилами OIML і ДСТУ, а також за розміром труб, які використовуються, ультразвукові сенсори поділяються за класами точності – від 0,2 до 2,5. Малі труби DN15-DN50 – це домашні і лабораторні вимірювання [32]. Великі витратоміри працюють з трубами DN200-DN2000+ – великі промислові вимірювання. Окрім цього діаметри DN80–DN150 використовують для комунальних систем та невеликих промислових об'єктів, DN200–DN600 - водопостачання міст середніх промислових магістралей. Такий поділ допомагає підбирати потрібний засіб до вимог вимірювань і умов роботи.

Ультразвукові витратоміри також входять до газових вимірювально-обчислювальних комплексів – ВОКГ. Для досягнення повторюваності результатів їх робота регламентується такими документами: AGA-9, ISO 17089-1, ISO 17089-2 та EN 12405 (у складі вимірювально-обчислювальних комплексів газу - ВОКГ). Стандарт AGA-9 (American Gas Association) – це базовий документ [33-36]. Цей стандарт використовують для комерційного обліку природного газу. Вимоги стандарту включають допустимі межі похибки, методи калібрування і вимоги до багатоканальних систем (multipath), які зменшують вплив турбулентності і асиметрії потоку. Стандарт AGA-9 вводить три нові терміни швидкості потоку: Q_{max} , Q_t і Q_{min} :

- Q_{max} – максимальна швидкість потоку газу через ультразвуковий витратомір;
- Q_t – найнижчий показник швидкості потоку, (більша похибка дозволено нижче цієї швидкості потоку);
- Q_{min} – найменша витрата (користувач може працювати там, де нижче цього значення помилка не відповідає вимогам AGA 9).

Користувач може працювати лише вище Q_{min} , бо нижче похибка не відповідає вимогам AGA 9. Стандарт AGA 9 розділяє ультразвукові витратоміри на два типи – менші за 12 дюймів, 12 дюймів і більше. Цей поділ був введений, оскільки гідродинамічні умови та вимоги до калібрування суттєво відрізняються залежно від діаметра трубопроводу. Стандарт ISO 17089-1 ставить загальні вимоги до ультразвукових витратомірів газу та вимагає відповідну точність, стабільність, повторюваність і надійність вимірювань. Стандарт ISO 17089-2 визначає процедури випробувань і оцінки відповідності включно з методами калібрування, перевірки на еталонних стендах та умовами експлуатації. Існує також європейський стандарт EN 12405, який регламентує застосування ультразвукових витратомірів у складі вимірювально-обчислювальних комплексів для комерційного обліку енергоносіїв [35].

Ультразвукові витратоміри за останні сорок років пройшли значну еволюцію. Спочатку були простими аналоговими TOF-засобами. Після цього їх замінили на цифрові сенсори, які під'єднуються до комп'ютерних систем. Кожен новий крок робить ультразвукові витратоміри складнішими. Спочатку витратоміри користувалися простими цифровими фільтрами. Потім вони стали регульованими системами зі змінними параметрами. Тепер ультразвукові витратоміри працюють за розумними моделями на основі нейронних мереж і методів машинного навчання. Тому сучасні ультразвукові витратоміри як інформаційно-вимірювальні системи на сьогодні можна класифікувати за рівнем розвитку на чотири покоління розвитку [1, 2, 4, 5, 23, 25, 28, 37]. Межі між поколіннями визначаються не лише часом впровадження, а, насамперед, сукупністю функціональних та алгоритмічних ознак.

Перший помітний прототип повністю електронного газового лічильника, який вимірював час прольоту, з'явився у 1992 році. Але ще у кінці 70-х років почали використовувати ультразвукові витратоміри для промислового вимірювання природного газу. Тоді і були закладені основи сучасних ультразвукових технологій. Нові покоління з'являлися приблизно кожні десять-п'ятнадцять років, коли поступово удосконалювалися як апаратна частина, так і алгоритмічне забезпечення.

Перше покоління – це прості ультразвукові датчики швидкості потоку, які мали такі особливості:

- один-два звукові шляхи (single / dual path);
- transit-time метод не потребував складної просторової інтеграції профілю швидкості;
- відсутня розширена діагностика;
- залежність від профілю потоку, закрутки і умов монтажу;
- низька точність обмежує використання, коли потрібен точний комерційний облік.

Це покоління є етапом становлення технології.

Друге покоління — це багатопроменеві (multipath) комерційні системи, яке характеризувалося:

- переходом до 4–8 акустичних каналів;
- використанням простих схем усереднення швидкості;
- суттєвим зменшенням впливу асиметрії і закрутки потоку.

На цьому етапі почався процес активного використання ультразвукових витратомірів для комерційного обліку, які обов'язково враховували галузеві стандарти та рекомендації. Це робило їх роботу надійнішою.

Третє покоління - це системи з потужною вбудованою діагностикою, яке має такі ознаки:

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

- широкий набір діагностичних параметрів;
- автоматичне підсилення сигналів (AGC) при певного відношенні сигнал-шум (SNR);
- перевірка часів та шляхів проходження сигналів на ідентичність;
- відстежування стабільної роботи системи на зношуваність, забруднення тощо;
- моніторинг роботи системи у штатному режимі;
- тестування та налаштування складових інформаційної вимірювальної системи.
- Лічильник став системою, яка не тільки вимірює, але й виконує її діагностування.
- Четверте покоління – це стандартизовані цифрові ІВС, яке має такі особливості:
- діагностика інтегрування у процес технічної перевірки;
- збір даних у SCADA-системи, використання цифрових платформ;
- віддалений доступ і аналітична обробка даних.

Все це означає, що ультразвукові газові витратоміри входять у цифрову систему вимірювання й стали частиною цієї системи. На сьогодні намітились шляхи створення наступного покоління витратомірів, які мають відрізнятися такими рисами:

- діагностика системи та верифікація (підхід Diagnostics-to-verification);
- аналіз забруднень і деградація перетворювачів;
- моніторинг у штатній експлуатації;
- тестування та налаштування;
- використання обчислювальної гідродинаміки (CFD) разом зі штучним інтелектом і машинним навчанням (AI/ML) допомагає в проектуванні і аналізі;
- мультисенсорні інформаційно-вимірювальні системи;
- захист даних і перевірка їх цілісності.

Сьогодні варто розрізняти чотири покоління ультразвукових витратомірів. Далі розвиватимуться ультразвукові ІВС, пов'язані з їх інтелектуалізацією, впровадженням цифрових двійників, AI-аналітики та розширеної діагностики.

ВИСНОВКИ

Запропоновано класифікацію ультразвукових витратомірів природного газу. Вона охоплює методи вимірювання, особливості будови, рівні інтеграції і етапи розвитку.

Ультразвукові витратоміри еволюціонували від простих засобів вимірювання до ультразвукових ІВС, які на сьогодні є інтелектуальними та модельно-орієнтованими системами, що відображає загальну тенденцію розвитку вимірювальної техніки. При цьому кількість каналів у витратомірах збільшувалося від I до IV покоління, що означало меншу похибку вимірювання, бо зменшувався вплив асиметрії швидкості потоку. Перспективні інтелектуальні ІВС V покоління нададуть можливість коригувати результати в реальному часі й дадуть змогу враховувати змінні гідродинамічні умови. Це означає, що ультразвукові ІВС можуть бути використані не тільки для комерційного обліку, але й для технологічного контролю в складних умовах експлуатації.

Класифікація ультразвукових витратомірів як інформаційно-вимірювальних систем дає змогу систематизувати відомості у галузі ультразвукових технологій витрати, визначати її рівень розвитку, сфери застосування та її подальший розвиток.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. A. A. Stetsenko, and Y. Y. Bilynskiy, "Overview of Current Trends in the Development of Ultrasonic Gas Flow Meters. Challenges and Prospects for Replacing Rotary and Turbine Gas Meters," in XXIV IMEKO World Congress "Think Metrology", Hamburg, Germany, Aug. 26–29, 2024, 4 p.
2. Y.Y. Bilinsky, A. A. Stetsenko, "Review of modern trends in the development of ultrasonic meters," Scientific Works of VNTU, no. 4, pp. 1–10, 2024, ISSN 2307-5376 (online).
3. Y.Y. Bilinsky, M. V. Gladyshevsky, M. O. Stasyuk, "Analysis of methods and means of controlling the flow of liquid and gaseous media and classification based on them," Scientific Works of VNTU, no. 1, 2015. [Online]. Available: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3748/5468>.
4. Lynnworth L. C. Ultrasonic Measurements for Process Control: Theory, Techniques, Applications. Boston : Academic Press, 1989. 702 p.
5. Lynnworth L. C., Liu Y. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005. Ultrasonics. 2006. Vol. 44. P. e1371–e1378.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

6. Baker R. C. *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications*. Cambridge : Cambridge University Press, 2016. 584 p.
7. Sanderson M. L., Yeung H. Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering techniques. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2002. Vol. 13. P. 125–142.
8. Xu L., Gong X. A review of ultrasonic flow measurement methods and applications. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2006. Vol. 17. P. 333–339.
9. Endress+Hauser. Ultrasonic flow measuring principle [Електронний ресурс]. URL: <https://www.endress.com/en/support-overview/learning-center/flow-measuring-principle-ultrasonic-sensors>.
10. Lanry Instruments. Classification of ultrasonic flowmeters [Електронний ресурс]. URL: <https://www.lanry-instruments.com/support/classification-of-ultrasonic-flowmeters/>.
11. Ultrasonic flow meter // Wikipedia [Електронний ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_flow_meter.
12. Korobko O. V. Classification of ultrasonic gas flowmeters by multi-criteria criteria. *Bulletin of Instrumentation*. 2015. No. 2. P. 45–52.
13. L. Kong, L. Zhang, H. Guo, N. Zhao, and X. Xu, “Time delay study of ultrasonic gas flowmeters based on VMD–Hilbert spectrum and cross-correlation,” *Sensors*, vol. 24, no. 5, art. 1462, Feb. 23, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24051462>
14. H. Zhou, Y. Liu, and Y. Wu, “Transit time determination based on similarity-symmetry method in multipath ultrasonic gas flowmeter,” *Metrology*, vol. 5, no. 4, art. 71, Nov. 18, 2025. <https://doi.org/10.3390/metrology5040071>.
15. L. S. Ishigita, O. Kaunde, and D. Mwakipesile, “Integrated ultrasonic and microwave hybrid metering system for wet gas,” *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 19, no. 1, 2025. <https://doi.org/10.1049/smt2.70039>
16. Y. Takeda, Ed., *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow*. Berlin: Springer, 2012, ISBN 978-4431540274.
17. Y. Y. Bilinsky, “Development and research of the mathematical model of the resonance ultrasonic measurement control method,” in *Measurement, Control and Diagnostics in Technical Systems (VKDTS-2017)*, 2017, pp. 159–160.
18. Kukharchuk, V.V., Pavlov, S.V., Holodiuk, V.S., et al. Information conversion in measuring channels with optoelectronic sensors, *Sensors*, 2022, 22(1), 271
19. Y.Y. Bilinsky, M. V. Gladyshevsky, K. V. Ogorodnyk, “Method and ultrasonic means of measuring the flow of liquid media”. Vinnytsia: VNTU, 2019, 123 p., ISBN 978-966-641-763-6.
20. N. Furuichi, “An influence of obstacle plate for uncertainty of flowrate measurement using ultrasonic Doppler method,” in *9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Engineering*, pp. 57–60, 2014.
21. I. V. Korobko, O. O. Drachuk, and V. A. Kovalenko, “Приладовий комплекс вимірювання витрати та кількості природного газу на підрунті різних фізичних методів вимірювання,” *Методи та прилади контролю якості*, no. 2, pp. 66–77, 2014.
22. Y. Y. Bilynsky, O. S. Horodetska, M. V. Hladyshevskiyi, D. V. Mykhalevskiy, Ż. M. Grądz, and G. Duskazaev, “Experimental investigations of the amplitude frequency meter of the velocity flowing environment,” *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 1080869, Oct. 1, 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2501614>.
23. M. Xu, and Y. Wang, “Hybrid ultrasonic flowmeters: Combining transit-time and Doppler techniques,” *Measurement Science and Technology*, vol. 26, no. 8, 2015.
24. P. D. Wilcox, *Ultrasonic arrays for non-destructive testing: Principles and applications*. Berlin: Springer, 2009, ISBN 978-1848827363.
25. ISO 6416:2007, *Hydrometry - Measurement of discharge by ultrasonic methods*. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
26. R. Ren, H. Wang, X. Sun, and H. Quan, “Design and Implementation of an Ultrasonic Flowmeter Based on the Cross-Correlation Method,” *Sensors*, vol. 22, no. 19, art. 7470, 2022.
27. G. Chen, G. Liu, B. Zhu, and W. Tan, “3D isosceles triangular ultrasonic path of transit-time ultrasonic flowmeter: theoretical design and CFD simulations,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 9, pp. 4733–4742, Sep. 2015.
28. R. Silva, and F. Costa, “Clamp-on ultrasonic flowmeters: Advances and applications in industrial metrology,” *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 75, 2020.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

29. J. Zhang, and Y. Wang, “Development of intelligent ultrasonic flow measurement systems with adaptive signal processing,” *Measurement Science and Technology*, vol. 32, no. 5, 2021.
30. ISO 17089-1:2010, Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas - Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva: ISO, 2010.
31. Y.Y. Bilynskiy, A. A. Stetsenko, “Improving the accuracy of natural gas flow measurement under conditions of contamination of the flow preparation rectifier”, *Information Selection and Processing*. 2025, 53 (129), 31-38. DOI:<https://doi.org>. ISSN 3041-182
32. OIML R 137-1&2, Gas meters - Part 1: Metrological and technical requirements; Part 2: Metrological controls and performance tests.
33. ISO 17089-1:2019, Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas - Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva: ISO, 2019.
34. AGA Report No. 9, “Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters,” American Gas Association, Arlington, VA, USA, Jun. 1998, 75 p.
35. 28. AGA Transmission Measurement Committee Report No. 7, “Measurement of Gas by Turbine Meters,” American Gas Association, Arlington, VA, USA, 70 p.
36. EN 12405-1:2005, Gas meters - Conversion devices - Part 1: Volume conversion.
37. ISO 17089-2:2012, Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas - Part 2: Meters for check metering in custody transfer. Geneva: ISO, 2012.
38. F. Matiko, V. Roman, H. Matiko, and D. Yalinskyi, “Investigation of ultrasonic flowmeter error in distorted flow using two-peak Salami functions,” *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 144–151, 2021. <https://doi.org/10.23939/jeecs2021.02.144>.

Дата надходження: 10.03.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 28.04.2026

Дата публікації: 18.06.2026

*Ця робота ліцензується відповідно до
Creative Commons Attribution 4.0 International License*

СТЕЦЕНКО АНДРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ – докторант кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, ***e-mail: andrii.energo@gmail.com***, ***http://orcid.org/0009-0004-2967-8867***

Andrii STETSENKO
**MODERN CLASSIFICATION OF ULTRASONIC INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEMS FOR
GAS FLOW**
Vinnytsia National Technical University