

УДК 681.121.89.082.4

Й. Й. Білинський, д-р техн. наук, проф.; А. А. Стеценко, канд. техн. наук
ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ УЛЬТРАЗВУКОВИХ
ЛІЧИЛЬНИКІВ

В роботі проведений аналіз сучасних тенденцій розвитку промислових ультразвукових газових лічильників, використання яких почалося наприкінці ХХ століття. Акцентується увага на переході від традиційних ротаційних та турбінних лічильників до більш сучасних ультразвукових технологій. Проаналізовано розвиток ультразвукових витратомірів у трьох поколіннях за останні тридцять років, де виділені особливості в технічному вдосконаленні, оновленні нормативної бази. Відмічено, що впровадження багатопроменевої ультразвукової технології, яка використовує кілька пар ультразвукових перетворювачів для підвищення точності вимірювань, стало важливим досягненням у цій галузі. Наведено приклади використання потужних програмних інструментів для математичного моделювання, такі як ANSYS, SolidWorks та інші, які є важливими у розробці та тестуванні ультразвукових газових лічильників третього покоління. Показано, що поєднання математичного моделювання з 3D-друком прототипів дозволяє виробникам ультразвукових газових лічильників третього покоління швидко вирішувати проблеми проектування конфігурацій лічильників, результати вимірювання яких мінімально залежать від наявності місцевих опорів, оптимізувати продуктивність лічильника в різних умовах монтажу та конфігурації, надаючи важливу інформацію для вдосконалення дизайну у відповідності до галузевих стандартів. Обговорюються перспективи впровадження ультразвукових лічильників третього покоління для різних застосувань, а також виклики, пов'язані з високою вартістю та необхідністю реконструкції трубопроводів. Прогнозується, що механічні лічильники, ймовірно, будуть витіснені ультразвуковими протягом наступних 5 – 10 років з урахуванням поступового зменшення їх ціни, оскільки сучасна нормативна та виробнича база вже готова підтримати цю трансформацію.

Ключові слова: *ультразвукові газові лічильники, вимірювання потоку, нормативні стандарти, математичне моделювання, адитивні технології, проектування, програмні інструменти.*

Вступ

Використання промислових ультразвукових газових лічильників почалося наприкінці ХХ століття, знаменуючи значний прорив порівняно з традиційними механічними газовими лічильниками, такими як турбінні та ротаційні лічильники. Перший помітний прототип повністю електронного газового лічильника, що використовує технологію вимірювання часу проходження для вимірювання потоку газу, був створений у 1992 році [7]. Однак саме розробка та впровадження ультразвукових лічильників для промислового вимірювання природного газу в кінці 1970-х років заклали основу для сучасного ультразвукового вимірювання газу.

Ультразвукові лічильники працюють на принципі вимірювання різниці часу проходження ультразвукових імпульсів, що поширюються під кутом за та проти течії потоку газу. Цей метод, відомий як принцип транзитного часу або часу проходження, забезпечує непряме вимірювання витрати газу, подібно до традиційних турбінних лічильників. Однак ультразвукові лічильники мають кілька переваг, зокрема низьку залежність від складу газу та відсутність рухомих частин, що зменшує час на обслуговування та підвищує надійність [2].

Впровадження багатопроменевої ультразвукової технології, яка використовує кілька пар ультразвукових перетворювачів для підвищення точності вимірювань, стало важливим досягненням у цій галузі. Це нововведення призвело до збільшення використання ультразвукових лічильників у газових мережах та встановлення стандартів і правил для їх застосування у процесах передачі природного газу.

Незважаючи на переваги ультразвукових газових лічильників, вони стикаються зі значними труднощами в конкуренції з механічними лічильниками, головним чином через вищу вартість і технічні складнощі. Механічні лічильники, зокрема турбінного та мембранного типу, традиційно використовуються на більш ніж 80 % станцій обліку по всьому світу. Їхні недоліки включають механічне зношування – навіть із сучасними підшипниковими технологіями – тертя, високу втрату тиску, нестабільність вимірювань, а також чутливість до вібрацій та коливань температури. Ці лічильники вимірюють витрату непрямо, через швидкість обертання, яка є пропорційною до витрати. Попри ці недоліки, механічні лічильники залишаються популярними, оскільки вони дешевші, широко виготовляються та добре відомі кінцевим користувачам. Наразі основними перешкодами для заміни механічних лічильників ультразвукові є високі витрати на модифікацію газопроводів, які повинні забезпечувати довгі прямі ділянки, необхідні для ультразвукових лічильників, а також висока вартість самих лічильників. Тим не менш, ультразвукові лічильники показали свою ефективність у забезпеченні точного, надійного та економічно вигідного обліку газу в різних застосуваннях від промислових до побутових. Це відображає постійну інновацію в технологіях вимірювання газу, викликану потребою у підвищенні точності, надійності та ефективності.

Основні етапи розвитку ультразвукових лічильників

Розглядаючи розвиток ультразвукових газових лічильників за останні 30 – 40 років, можна виділити три покоління, кожне з яких тривало приблизно 10 – 15 років:

Покоління 1: Орієнтоване на промислові лічильники для великих витрат і високого тиску. Основні характеристики включали базову точність у межах 1 – 3 %, роботу при тиску понад 10 бар і мінімум два канали. Недоліки таких пристроїв включають чутливість до змін профілю потоку, низьку чутливість ультразвукових сенсорів, високе енергоспоживання та громіздкий дизайн без вбудованої діагностики, що вимагало калібрування в умовах експлуатації природного газу (Рис. 1).



Рис. 1. Типовий вигляд лічильника першого покоління

Покоління 2: Орієнтоване на промислові лічильники для середніх і великих витрат за різних тисків. Ці лічильники характеризувалися покращеною точністю (0,5 – 1 %), могли працювати при атмосферному тиску та вище, і включали щонайменше два ультразвукові промені. Вони мали розширені діагностичні можливості, більш ергономічний дизайн і нижче енергоспоживання, але потребували довгих прямих відрізків труб порівняно з турбінними лічильниками та спеціальних перетворювачів для досягнення найвищої точності, а також зовнішнього джерела живлення та калібрування.



Рис. 2. Типовий вигляд лічильників другого покоління

Покоління 3: Найсучасніше покоління, спрямоване на заміну турбінних і ротаційних

лічильників для будь-яких витрат і тисків. Ці лічильники мають:

- Точність від 0,5 до 1 %;
- Витрату не менше 1:160;
- Робочий тиск від 1 бар до 160 бар;
- Щонайменше 2 ультразвукові промені;
- Відхилення профілю потоку на вході в лічильник не впливають на похибку вимірювання, відсутня необхідність у прямих трубопроводах перед і після лічильника;
- Не потребує калібрування на природному газі;
- Автономне живлення від вбудованих батарей (не менше 4 років);
- Розміри корпусу від фланця до фланця повинні відповідати розмірам подібних ротаційних і турбінних лічильників;
- Вбудований коректор потоку (EVC), датчики тиску та температури;
- Ергономічний дизайн;
- Розширені діагностичні функції: діагностика на основі швидкості звуку, діагностика за поточним профілем, діагностика на основі співвідношення сигнал/шум, прогнозування можливих збоїв, наприклад, через забруднення сенсора, можливість проведення діагностичних сесій для запису всіх параметрів пристрою, наявність архівів нестандартних ситуацій та збоїв.

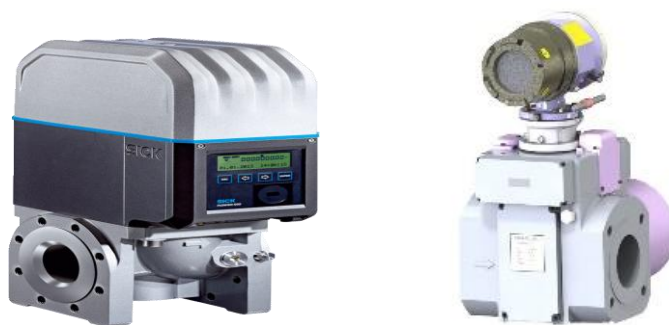


Рис. 3. Типовий вигляд лічильників третього покоління

Кожне покоління означає значний крок уперед у вирішенні експлуатаційних неефективностей і технічних обмежень попередніх моделей, що відображає постійні інновації та адаптацію в технології ультразвукових газових лічильників [6].

Діагностичні можливості ультразвукових лічильників Покоління 2 і 3 є надзвичайно розвиненими, що забезпечує їх надійну роботу в різних умовах. Ключові діагностичні можливості включають:

- **Діагностика швидкості звуку:** Перевіряє, щоб швидкість звуку, виміряна по різних каналах, не відхилялася більш ніж на 0,3 %, що забезпечує точність вимірювання потоку.

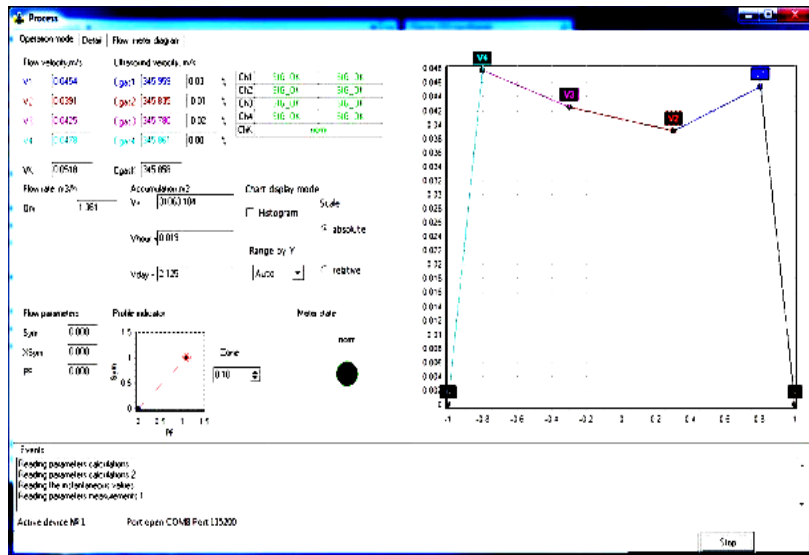


Рис. 4. Діагностика профілю потоку

- **Діагностика профілю потоку:** Оцінює профіль потоку через лічильник для виявлення будь-яких аномалій або змін, які можуть вплинути на точність вимірювань.
- **Діагностика співвідношення сигнал/шум:** Контролює якість сигналу відносно фону шуму, що є важливим для підтримання точності вимірювань.
- **Прогнозувальна діагностика:** Ці системи прогнозують можливі збої, наприклад, через забруднення сенсора, що дозволяє проводити профілактичне обслуговування.

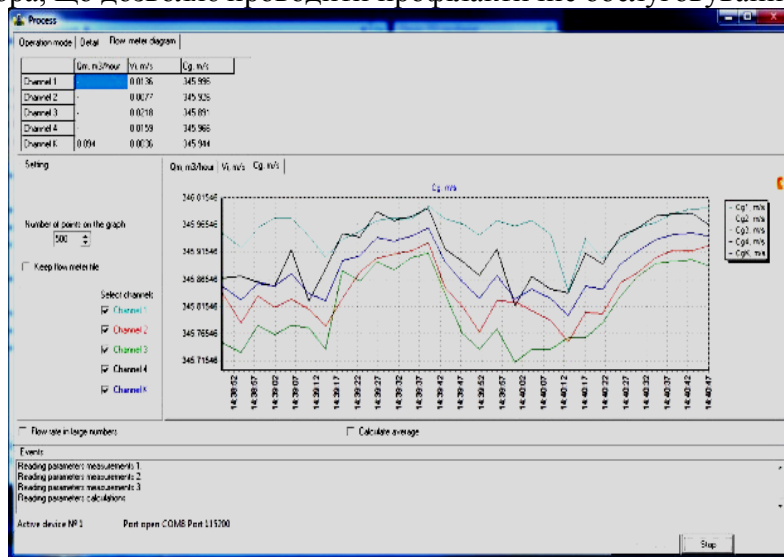


Рис. 5. Діагностичний сеанс

- **Діагностичні сесії:** Дозволяють записувати всі параметри пристрою під час певних сесій для всебічного аналізу його роботи.
- **Архіви аварій:** Ультразвукові лічильники ведуть журнали нестандартних подій і збоїв, що надає цінні дані для усунення несправностей і покращення роботи лічильника.

Удосконалення нормативних стандартів щодо ультразвукових газових лічильників

Розробка нормативних документів щодо ультразвукових газових лічильників також має періодичність удосконалення приблизно кожні 10 років. До основних стандартів належать:

- **AGA Звіт № 9** "Вимірювання газу багатопроменевими ультразвуковими лічильниками" [1]. Цей документ, розроблений Американською газовою асоціацією (AGA), визначає специфікації та рекомендації щодо використання багатопроменевих ультразвукових

лічильників для вимірювання потоку природного газу, зосереджуючись на точності, надійності та вимогах до передачі права власності. Звіт AGA 9 має 4 видання:

Перше видання (1998 р.): Мета: Впровадження основних положень щодо використання ультразвукових лічильників у газовій промисловості, зокрема багатопроменевих ультразвукових лічильників. Було встановлено початкові стандарти їх застосування, зосереджуючись на монтажі, технічному обслуговуванні та вимогах до точності. Основні оновлення: це видання надало основні рекомендації щодо впровадження цих лічильників у газовій промисловості, включаючи технічні специфікації, обробку даних та методи перевірки лічильників.

Друге видання (2007 р.): Мета: Уточнити та розширити початкові рекомендації на основі відгуків галузі та розвитку ультразвукових технологій. Основні оновлення: це видання включало більш детальні процедури калібрування, розширену діагностику та оцінку продуктивності. Було покращено розуміння умов, за яких ці лічильники працюють оптимально, а також розширено сферу застосування для ширшого кола умов монтажу та складу газу.

Третє видання (2017 р.): Мета: Подальше оновлення та вдосконалення практик з урахуванням розвитку ультразвукових технологій і цифрової обробки даних. Видання спрямоване на підвищення надійності та точності лічильників за різних умов експлуатації. Основні оновлення: видання 2017 року підкреслило покращення діагностичних можливостей лічильників, що допомагає операторам краще контролювати та підтримувати роботу лічильників. Також було введено рекомендації для складніших установок і оновлено стандарти відповідно до покращення технології сенсорів і обробки даних [10].

Четверте видання (2022 р.): Мета: Подальше адаптування до останніх технологічних інновацій і нормативних змін у галузі, забезпечення актуальності та корисності стандартів. Основні оновлення: це останнє видання, ймовірно, включає подальше покращення діагностики лічильників, можливості інтеграції з сучасними цифровими системами та, можливо, нові стандарти, пов'язані з впливом на довкілля та енергоефективністю. Конкретні деталі потребують перевірки у документі 2022 року.

ISO 17089-1 [4]. "Вимірювання потоку рідини в закритих трубопроводах — Ультразвукові лічильники для газу — Частина 1: Лічильники для передачі права власності та розподілу". Цей стандарт застосовується до ультразвукових газових лічильників, які використовуються для критичних застосувань, таких як передача права власності та розподільний облік, що вимагає високої точності та надійності. Стандарт ISO 17089-1 має два видання:

ISO 17089-1:2010: Це видання стосується ультразвукових лічильників часу проходження, що використовуються для передачі права власності та розподільного обліку.

ISO 17089-1:2019: Це більш нове видання, яке продовжує охоплювати ультразвукові лічильники для газу, зосереджуючись на лічильниках для передачі права власності та розподільного обліку. Це є друге видання стандарту.

OIML R 137-1&2 [4]: "Газові лічильники - Частина 1: Метрологічні та технічні вимоги, Частина 2: Метрологічний контроль і випробування продуктивності". Цей стандарт охоплює комплексні вимоги та методи випробування для газових лічильників, зосереджуючись на забезпеченні точного та надійного вимірювання газу в регульованих умовах. Стандарт OIML R 137 має кілька видань:

OIML R 137-1 (2006): Перше видання, що зосереджується на метрологічних та технічних вимогах для газових лічильників.

OIML R 137-1 (2012): Оновлене видання, яке замінило видання 2006 року.

OIML R 137-1&2 (2020): Найновіше доступне видання, яке продовжує вдосконалювати стандарти на основі технологічних розробок і відгуків галузі. Як видно з вищесказаного, зміни в нормативних документах швидко відображають зміни, що відбуваються у наступних поколіннях ультразвукових газових лічильників від першого покоління до другого та далі до третього покоління.

Математичне моделювання та технології виробництва

Потужні програмні інструменти для математичного моделювання, такі як ANSYS, SolidWorks, є важливими у розробці та тестуванні ультразвукових газових лічильників третього покоління. Ці сучасні засоби моделювання дозволяють розробникам тестувати роботу лічильників без необхідності фізично перебувати у лабораторії. Це сприяє вирішенню ключових питань дизайну, таких як оптимальне розташування сенсорів і вибір конструкції пристрою, яка мінімізує вплив локальних опорів на похибку вимірювання потоку.

Наприклад, було проведено симуляцію в SolidWorks для профілю потоку ультразвукового газового лічильника з чотирма каналами моделі GFA414 DN100. Таке моделювання надає уявлення про те, як дизайн лічильника може вплинути на його продуктивність та точність, дозволяючи вдосконалення перед створенням фізичних прототипів та їх тестуванням. Такі симуляції є критичними для підвищення надійності та ефективності лічильників, забезпечуючи точність їх роботи у різних умовах [10].

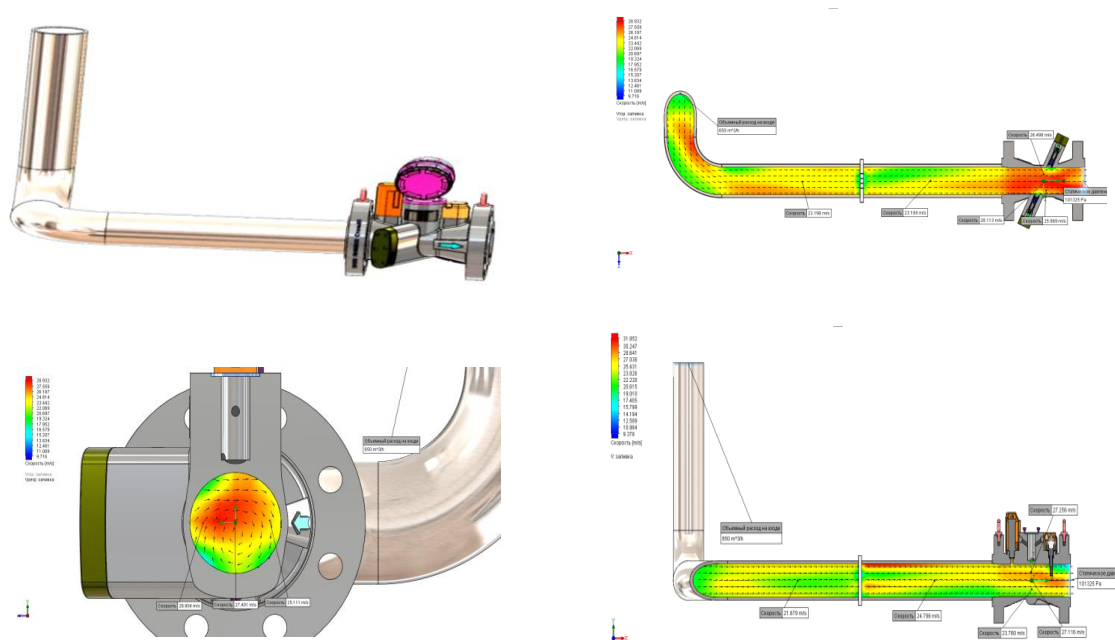


Рис. 6. Розрахований профіль без випрямляча потоку Zanker

Важливо зазначити, що різні стандарти вимагають проведення певної кількості тестів для оцінки впливу локальних опорів на точність вимірювання потоку газу:

- **AGA-9** вимагає проведення не менше 5-ти тестів.
- **ISO 17089** вимагає проведення не менше 9-ти тестів.
- **OIML 137** також вимагає проведення не менше 9-ти тестів.

За допомогою методів математичного моделювання розробники можуть швидко оцінювати потенційні зміни в точності розроблюваних ультразвукових газових лічильників для забезпечення відповідності цим нормативним стандартам [4].

Для ілюстрації було проведено симуляцію в SolidWorks профілю потоку для чотирьохканального ультразвукового лічильника моделі GFA414 DN100 за витрати 650 м³/год та атмосферного тиску. Було проаналізовано вплив локального опору, створеного двома вигинами труб, розташованими в різних площинах. Профіль потоку був проаналізований як зі струменевипрямлювачем типу Занкер (Рис. 1), так і без нього (Рис. 2).

Цей приклад підкреслює, як моделювання може допомогти передбачити та оптимізувати продуктивність лічильника в різних умовах монтажу та конфігурацій, надаючи важливу інформацію для вдосконалення дизайну та відповідності галузевим стандартам.

Завдяки використанню цих сучасних інструментів моделювання розробники лічильників можуть досягти більшої точності та надійності своїх продуктів, прокладаючи шлях до більш точних і ефективних рішень для вимірювання потоку газу в різних застосуваннях.

Застосування математичного моделювання у розробці ультразвукових лічильників третього покоління також можна побачити в підході, описаному в статті [3].

Хоча математичне моделювання є потужним інструментом, воно не може надати остаточні відповіді щодо кінцевих метрологічних характеристик розроблюваного пристрою. Остаточна перевірка цих характеристик може бути досягнута лише шляхом тестування на калібрувальних стендах. Швидке прототипування, яке здійснюється за допомогою 3D-друку, відіграє ключову роль у цьому процесі.

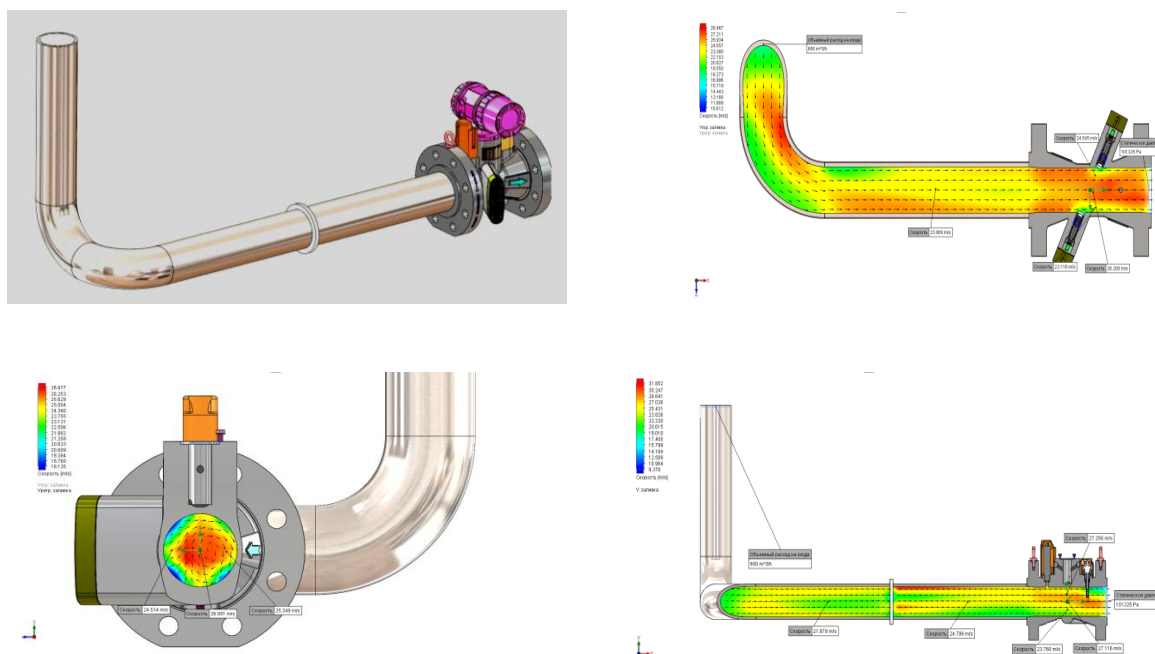


Рис. 7. Розрахунковий профіль з випрямлячем потоку Zanker

На сьогоднішні можливості технології 3D-друку є досить широкими, пропонуючи велику кількість матеріалів, придатних для прототипування. Ці матеріали повинні мати достатню міцність і герметичність після друку, що може зробити їх досить дорогими. Однак здатність виготовити початкові прототипи змодельованих лічильників протягом 20 – 40 годин пропонує значні переваги порівняно з традиційними методами прототипування.

Таким чином, поєднання математичного моделювання з 3D-друком прототипів дозволяє виробникам ультразвукових газових лічильників третього покоління швидко вирішувати проблеми проектування конфігурацій лічильників, результати вимірювання яких мінімально залежать від наявності місцевих опорів. Це інтегрування передових технологій забезпечує можливість швидкого тестування та ітерацій нових конструкцій, прискорюючи процес розробки та підвищуючи надійність лічильників.

В таблиці 1 зведені основні метрологічні характеристики, функціональні та сервісні особливості ультразвукових витратомірів.

Основні метрологічні характеристики, функціональні та сервісні особливості ультразвукових витратомірів

		I Покоління	II Покоління	III Покоління
1	Типові приклади	Istramet, Daniel, RMG	Emerson, Flowsic, Energoflow GFE	Flowsic, RMG, Honeywell, GFA
2	Кількість каналів	2 канали	До 12 каналів – надійна робота досягається за рахунок резервування апаратного забезпечення	2 або 4 канали – надійна робота досягається за допомогою вдосконалених датчиків
3	Експлуатаційний тиск	Менше 10 бар	Розширений діапазон тисків	Розширений діапазон тисків
4	Точність	3%	1 %, 0,5 %, поліноміальне коригування	0,2 % або краще після калібрування, поліноміального та багаторівневого налаштування
5	Розмір	Громіздкий	Обтічний	Обтічний
6	Вимоги до прямих трас	До і після лічильника потрібні довгі прямі траси, дуже чутливі до збурень потоку	Перед і після лічильника потрібні коротші прямі ділянки, менш чутливі до збурень потоку	Низька сприйнятливості до збурень потоку
7	Електроніка	На основі процесора,	На основі багато процесорної системи	На основі атомноядерного процесора
8	Виходи та комунікація	Імпульсний і аналоговий виходи	Імпульсний, аналоговий, цифровий	Імпульсний, аналоговий, цифровий
9	Потужність споживання	Більше 300 Вт	Менше 100 Вт	Менше 30 Вт
10	Діагностичні особливості	Збій обладнання	Справність обладнання, швидкість звуку, профіль потоку, співвідношення шум/сигнал	Справність апаратного забезпечення, швидкість звуку, профіль потоку, співвідношення шум/сигнал, прогноз відмови
11	Корекція гучності	Зовнішній	Зовнішня	Зовнішній / вбудований
12	Передача даних	Зовнішній	Зовнішня	Зовнішній / вбудований

Перспективи впровадження ультразвукових лічильників

Основною проблемою масового впровадження ультразвукових лічильників третього покоління є їхня вартість. Зрозуміло, що якщо ці лічильники будуть значно дорожчими, споживачі можуть вагатися щодо їх масового впровадження, незважаючи на їхні значні технічні переваги. Це може обмежити ринок лише вузьким сегментом. Однак, навіть за таких обставин, використання ультразвукових лічильників третього покоління, здатних вимірювати широкий діапазон витрат і замінити механічні лічильники без необхідності реконструкції вузлів обліку, буде дуже затребуваним. Цей попит викликаний значними обсягами неврахованого газу на розподільних станціях у літній час або вночі через низьке споживання,

як, наприклад, описано у ситуації [5] для італійської мережі передачі газу, де встановлено понад 7000 ротаційних та турбінних лічильників.

Водночас, якщо виробництво ультразвукових лічильників третього покоління можна буде масштабувати, а їхню вартість знизити до рівня традиційних механічних лічильників з електронним коректором об'єму (EVC), ринкові перспективи стають практично необмеженими. Виробники, які зможуть першими вийти на цей ринок, отримають значну конкурентну перевагу.

Висновки

В роботі запропоновано розглядати процес розвитку ультразвукових витратомірів в трьох поколіннях, які відрізняються за похибкою вимірювання, чутливістю ультразвукових сенсорів, чутливістю до змін профілю потоку, рівнем енергоспоживання, цифровою обробкою даних. Наявністю діагностичних функцій, рівнем автоматизації проєктування та їх моделювання роботи.

На сьогодні витратоміри знаходяться на межі революційних змін у вимірюванні потоку газу, а саме масової заміни турбінних і ротаційних лічильників на ультразвукові лічильники третього покоління. Ці лічильники пропонують вищі метрологічні та експлуатаційні характеристики, а також мають розширений набір діагностичних функцій. Механічні лічильники, які домінували на ринку понад століття, ймовірно, будуть значно витіснені ультразвуковими лічильниками протягом наступних 5 – 10 років з урахуванням поступового зменшення їх ціни. Нормативна та виробнича база вже готова підтримати цю трансформацію. Окрім цього розглянуто розроблені міжнародні нормативні документи щодо ультразвукових газових лічильників, а також наведені приклади моделювання витратомірів за допомогою спеціалізованих програмних пакетів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. AGA Report № 9, Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters, June 1998. American Gas Association, 1515 Wilson Boulevard, Arlington. VA 22209. 75 p.
2. AGA Transmission Measurement Committee Report № 7, Measurement of Gas by Turbine Meters, American Gas Association, 1515 Wilson Boulevard, Arlington. VA 22209. 70 p.
3. Bilynsky Y., Stetsenko A., Ogorodnik K. Justification of the possibility of building an integrated ultrasonic measuring transducer of natural gas consumption. *Automatyka, Pomiary w Gospodarcei Ochronie Środowiska*. 2024. Vol. 14, № 2 (2024). P. 47 – 50. <http://doi.org/10.35784/iapgos.5876>.
4. ISO 17089-1:2019-08. Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas – Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement, 2019-08. P. 114.
5. Link between Unaccounted-for-Gas in transmission networks and flow-meters accuracy / G. Ficco et al. *19th International Flow Measurement Conference 2022*, Chongqing, CHINA, 01-04 November 2022. P. 1 – 5. DOI:10.21014/tc9-2022.069.
6. ANN Based Data Integration for Multi-Path Ultrasonic Flowmeter / Huichao Zhao et al. *IEEE Sensors Journal*. February 2014. Volume 14, Issue 2. P. 362 – 370.
7. Kułaga Paweł, Jacek Jaworski. Wyniki badań trwałości gazomierzy miechowych uzyskiwane z zastosowaniem różnych metodyk – analiza porównawcza. *Nafta-Gaz*. 2016. №8/2016. P. 645 – 650. DOI: 10.18668/NG.2016.08.09.
8. OIML R 137-1&2:2012 (E), International recommendation Gas meters – Part 1: Metrological and technical requirements, Part 2: Metrological controls and performance tests, 2012. 70 p. URL: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r137-1-2-e12.pdf.
9. OIML V 2-200:2012 International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 91 p. URL: https://www.oiml.org/en/files/pdf_v/v002-200-e12.pdf.
10. Lunde P., Froyssa K. E., Vestheim M. GERG Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II, Monograph, Groupen Européen de Recherches Gazières, GERG TM 11, VDI Verlag, Düsseldorf, 2000. 110 p. ISBN: ISBN 3-18-385408-2.
11. Bilynsky Y., Horodetska O., Hladyshevskiy M. Experimental investigations of the amplitude-frequency meter of the velocity flowing environment. *Proceedings of SPIE*. 2018. №10808. P. 1080869. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/34557/92778.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. DOI: 10.1117/12.2501614.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2024.

Стаття пройшла рецензування 18.12.2024.

Білинський Йосип Йосипович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри загальної фізики,
e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com.

Стеценко Андрій Анатолійович – канд. техн. наук, докторант кафедри загальної фізики.
Вінницький національний технічний університет.