

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ВИТРАТИ ГАЗУ

Вінницький національний технічний університет

Об'єктом дослідження є процес проєктування ультразвукових інформаційно-вимірювальних систем для визначення витрати газу та шляхи підвищення точності вимірювання в реальних умовах експлуатації, які можуть характеризуватися турбулентністю потоку, геометричними обмеженнями трубопроводів і забрудненням вимірювальних каналів. Запропоновано ітераційну методологію проєктування, яка поєднує теоретичний аналіз поставленої задачі, CFD-моделювання, розробку конструкції засобу, експериментальні дослідження та методи штучного інтелекту в межах замкненого циклу «модель – алгоритм – апаратна реалізація – експеримент – корекція». Значну роль у процесі проєктування відіграє штучний інтелект. Застосування CFD-моделювання та інтелектуальних методів обробки даних дає змогу оптимізувати конструкцію витратоміра та суттєво скоротити термін проєктування. Методологія додатково насичена локальними зворотними зв'язками, що забезпечує адаптивність і корекцію на кожному етапі проєктування. Використання такої ітераційної моделі проєктування ультразвукових витратомірів можливим за наявності спеціалізованого обладнання та відповідного програмного забезпечення, яке повинно включати: середовище для числового моделювання газових потоків, 3D-принтер, вбудовані комп'ютерні системи для цифрової обробки інформації, стендові пристрої для дослідження роботи засобів вимірювання. Застосування запропонованої методології дало змогу: розробити пристрій стабілізації потоку для багатопроменевого ультразвукового лічильника газу GFA202 DN50, що дозволило поєднати компактність конструкції з високою точністю, властивою лічильникам більших типорозмірів, які відповідають вимогам класу 0,5, хоча сам лічильник належить до класу точності 1; створити нову конструкцію чотириканального витратоміра з однаковими сигнальними шляхами, середнє значення похибки якого не перевищує 0,8 % у широкому діапазоні витрат, тоді як класичний чотириканальний засіб має похибку до 1,3 %; запропонувати метод корекції результатів вимірювання витрати, який базується на використанні калібрувальних даних під час калібрування та повірки ультразвукових витратомірів. Реалізація запропонованих рішень дозволила зменшити вплив гідродинамічних збурень і конструктивних факторів на результат вимірювання та підвищити точність витратоміра. Отримані результати можуть бути використані в промислових газотранспортних системах, зокрема за умов обмежених довжин прямих ділянок трубопроводів та змінних режимів течії.

Ключові слова: ультразвуковий витратомір, інформаційно-вимірювальна система, ітераційна методологія, CFD-моделювання, штучний інтелект, корекція похибок, газові потоки.

Вступ

Ультразвукові лічильники газу існують вже понад 40 років і постійно вдосконалюються. Сучасні ультразвукові витратоміри (УЗВ) — це комп'ютерні системи реального часу. Точність вимірювання витрат залежить не лише від певної кількості факторів впливу, але й також від архітектури комп'ютерної системи, від алгоритмів обробки сигналу та від даних, що отримуються в результаті вимірювань фізичних параметрів. УЗВ за цей час пройшли кілька поколінь. Кожне покоління має свої метрологічні і конструктивні особливості, відповідають сучасним вимогам, які закріплені в міжнародних стандартах [1]. Проєктування таких систем передбачає не лише розроблення окремих конструктивних і алгоритмічно-програмних рішень для кожного функціонального блоку, дослідження їх метрологічних характеристик, але й узгодженої роботи в умовах експлуатації. Цей процес є достатньо складним і довготривалим. І тільки завдяки сучасним системам автоматичного проєктування, моделювання, швидке виготовлення експериментальних зразків, проведення експериментальних досліджень дає змогу прискорити та здешевити створення сучасних вимірювальних засобів



і інформаційно-вимірювальних систем заданої точності, надійності та швидкодії. Отже, проектування таких систем потребує комплексного методологічного підходу, що поєднує класичні принципи метрології та новітні інформаційні технології [2], [3].

Огляд літератури і визначення проблеми

Головне в розвитку та впровадженні ультразвукових систем вимірювання витрати природного газу — це розв’язання технічних задач, які роблять вимірювання витрати газу точним і узгодженим. Закони України «Про метрологію та метрологічну діяльність» (для УЗВ: обов’язкова повірка, відповідність технічним регламентам, простежуваність до еталонів), «Про ринок природного газу» (регулює: комерційний облік газу, взаємодію операторів ГРМ/ГТС, вимоги до вузлів обліку) і галузеві документи, наприклад «Кодекс газорозподільних систем» (регламентує: вузли обліку газу, вимоги до вимірювальних комплексів, похибки вимірювання, умови встановлення витратомірів) [4]—[7]. Міжнародні правила [8]—[11] задають характеристики ультразвукових пристроїв вимірювання. На сьогодні немає єдиного підходу до проектування ультразвукових витратомірів: кожен розробник досліджує лише окрему частину чи блок, не створюючи цілісної системи. Через це важко створювати стандарти і впроваджувати такі системи в практику. Класичні підходи працюють так: спочатку формують технічне завдання, потім будують математичну модель, далі розробляють прототип, потім проводять експериментальну перевірку і насамкінець впроваджують у виробництво. Недоліками такого підходу є обмежена гнучкість, тривалий період розробки та досліджень, а також не завжди успішна адаптація до змінних умов експлуатації. Причина в тому, що процес проектування жорстко структурований і в процесі проектування мало інтеграції з новими методами обробки даних і комп’ютерним моделюванням [12]. У роботі [13] розглядають модель життєвого циклу вимірювальної системи «водоспад». Модель «водоспад» передбачає перехід до наступного етапу проектування лише після повного завершення попереднього. Такий підхід добре працює для однорідних систем, але для складних гібридних систем, які поєднують апаратні та програмні компоненти, модель «водоспад» вже не працює.

Останні наукові статті про УЗВ часто наголошують на необхідності підвищення точності вимірювань. Дослідники поліпшують конструкцію ультразвукових перетворювачів і створюють нові алгоритми обробки сигналів [14]—[16], пропонують методи компенсації помилок, які виникають через зміну умов експлуатації, розробляють багатоканальні вимірювальні схеми. Проте питання узгодженості результатів між каналами, особливо коли треба визначати похідні параметри, ще не досліджені достатньо. Проблема полягає в тому, що складно описати просторово неоднорідні потоки і немає універсальних моделей, які відповідають різним умовам експлуатації.

Окремий напрям досліджень спрямований на те, щоб зробити вимірювальні системи безконтактними і довговічними. Вимірювальні системи отримують безконтактність і довговічність завдяки технологіям без рухомих частин і покращення будови сенсорів. Питання оптимізації конструкції сенсорних блоків на основі моделювання потоків, вибору перетворювачів, методів калібрування, а також впливу геометрії трубопроводу і схеми вимірювання розглянуто у працях [17]—[19]. Методи інтеграції в інформаційні системи та алгоритми обробки сигналів наведено в роботах [14], [20]. У працях [14]—[16] описано комп’ютерну систему автоматизованого проектування УЗВ різних типів, що включає аналітичні залежності для визначення координат і вагових коефіцієнтів акустичних каналів п’яти та шести каналних хордових витратомірів, а також підходи до застосування штучних нейронних мереж для підвищення точності вимірювання витрати в умовах складно деформованих профілів потоку.

Отже, аналіз літератури показав відсутність єдиної систематизації наукових результатів, що ускладнює їх порівняння, а також виявив такі невирішені питання в процесі проектування:

- недостатня узгодженість результатів у багатоканальних вимірювальних структурах;
- обмеженість моделей, що враховують реальний склад і неоднорідність газових сумішей;
- відсутність інтеграції фізично обґрунтованих моделей з інтелектуальними методами обробки даних.

Причинами невирішеності зазначених проблем є:

- складність фізичних процесів поширення ультразвуку в реальних середовищах;
- обмеженість експериментальної бази для валідації моделей;
- орієнтація нормативних документів на окремі параметри (витрата) без комплексного підходу;
- швидкий розвиток цифрових технологій, що випереджає їх метрологічне забезпечення.

Отже, з вищезазначеного, можна сформулювати загальну невирішену проблему — це відсутність універсальної методології проектування ультразвукових інформаційно-вимірювальних систем

витрати газу, яка забезпечувала б комплексне визначення параметрів газового потоку та узгодженість багатоканальних вимірювань з сучасними цифровими технологіями. Проектування повинно займати менше часу, проєктовані системи повинні бути довговічнішими, мати ширший діапазон вимірювань, системи діагностики і самоконтролю, можливості інтегрування в сучасні інформаційні середовища, а також узгодженої роботи всіх блоків. До того ж помилки у вимірюванні витрати газу можуть привести до великих економічних втрат і юридичних суперечок, бо комерційний облік має правове і фінансове значення. Тому системи мають відповідати міжнародним стандартам. Про ці стандарти зазначено на початку статті. Системи мають забезпечити довіру між постачальниками і споживачами. Таким чином, проектування ультразвукових вимірювальних систем витрат — це процес багатоступеневий, а через відсутність сучасної методології він є фрагментарним і залежним від індивідуальних рішень розробників, що знижує ефективність і ускладнює стандартизацію.

Метою дослідження є розроблення ітераційної методології проектування ультразвукових інформаційно-вимірювальних систем витрати газу на основі інтеграції CFD-моделювання, експериментальних досліджень і методів штучного інтелекту. Це дасть можливість підвищити точність і надійність вимірювань у реальних умовах експлуатації та забезпечити відповідність міжнародним стандартам.

Для підтвердження ефективності запропонованої методології проектування:

- створити нові технічні рішення для зменшення впливу турбулентності потоку шляхом застосування стабілізатора потоку роторного та стільникового типів;
- розробити нові чотириканальні витратоміри;
- запропонувати методику корекції похибок вимірювання, спричинених забрудненням вимірювальних каналів.

Об'єкт дослідження — процес проектування та функціонування ультразвукових інформаційно-вимірювальних систем витрати газу, зокрема, багатоканальних УЗВ в умовах турбулентного потоку, геометричних обмежень трубопроводів.

Результати досліджень

Запропонована методологія проектування ґрунтується на системному ітераційному підході, що передбачає циклічну взаємодію між етапами: формування математичних моделей, уточнення алгоритмів обробки даних із застосуванням методів штучного інтелекту, практична верифікація в лабораторних і натурних умовах. На відміну від традиційних лінійних схем, ітераційна модель дозволяє адаптивно уточнювати постановку задачі, параметри моделей, алгоритми обробки даних і конструктивні рішення [8]. Це забезпечує узгодженість між теоретичними припущеннями та реальними умовами експлуатації, а також зменшення систематичних і випадкових похибок вимірювання.

Узагальнена архітектура проектування ультразвукової системи витрати включає блок підготовки потоку, блок ультразвукових перетворювачів, блок попередньої обробки сигналу та блок цифрової обробки інформації, реалізований на базі вбудованих комп'ютерних систем (рис. 1).



Рис. 1. Ітераційна модель науково-інженерного циклу проектування ультразвукових інформаційно-вимірювальних систем витрати газу

Ключову роль у забезпеченні точності та стійкості вимірювань відіграє комп'ютерна система обробки даних, яка функціонує в режимі реального часу та реалізує алгоритми вимірювання, корекції та самодіагностики.

Кожен блок УЗВ проєктується і покращується в процесі науково-інженерного циклу. Цикл включає: теоретичний аналіз процесів; створення і уточнення технічного завдання; числове моделювання; виготовлення пробного зразка; проведення досліджень і аналіз результатів. Штучний інтелект присутній на всіх етапах проєктування, допомагає уточнити завдання, оптимізувати параметри моделі, адаптувати конструктивні рішення. Такий підхід дає змогу швидко знаходити помилки та приймати оптимальні рішення, швидко реагувати на зміни в середовищі та пристосовуватись до реальних умов. Реалізація замкнутого повторюваного циклу «модель – алгоритм – апаратна реалізація – експеримент – корекція» дозволяє за обмежених ресурсів підвищити швидкість процесу проєктування.

Для використання ітераційної моделі проєктування УЗВ необхідне спеціалізоване обладнання та програмне забезпечення, яка може мати такі складові:

- середовище для числового моделювання газових потоків і поширення ультразвукових сигналів – SOLIDWORKS Flow Simulation;
- системи генеративного ІІІ на базі LLM (Large Language Models) для уточнення параметрів моделі та конструктивних рішень;
- 3D принтер нового покоління KLEMA PRO;
- вбудовані комп'ютерні системи для цифрової обробки інформації та реалізації алгоритмів вимірювання, корекції та самодіагностики;
- стендові пристрої для багатоканальних УЗВ та пристроїв стабілізації газового потоку.

Ітераційну методологію використано під час проєктування нової модифікації багатопроменевого ультразвукового лічильника газу GFA202 Dn50 (рис. 2).

У цьому засобі успішно реалізовано вимірювання витрати газу в межах стандартної довжини корпусу 150 мм. Проєктування лічильника здійснювалося в кілька ітерацій, що включали зміну конструкції вбудованого пристрою стабілізації газового потоку. Його параметри розраховувалися та моделювалися в середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation з урахуванням впливу місцевих опорів на похибку вимірювання витрати газу та втрати тиску. На основі отриманих даних конструкція уточнювалася за допомогою генеративного ІІІ на базі LLM (Large Language Models). Це дозволило поєднати компактність конструкції з високою точністю, властивою лічильникам більших типорозмірів, які відповідають вимогам класу 0,5 згідно з ISO 17089, хоча сам лічильник належить до класу точності 1 [22].

З метою підвищення точності багатоканальних УЗВ за результатами числового моделювання запропоновано нове конструктивне рішення чотириканального УЗВ з однаковими сигнальними шляхами [23]. Математична модель засобу, визначення похибок, порівняльний аналіз з класичним витратоміром подано в роботі [24].

На рис. 3 показано схему розташування каналів витратоміра, змодельованої в середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation.

Процес супроводжувався висновками та пропозиціями ІІІ. В результаті аналізу використано позиції акустичних каналів і вагові коефіцієнти, визначені за методом Гаусса–Якобі, який серед відомих методів інтегрування вибрано як найдоцільніший. Реалізація цього процесу потребувала виконання низки ітерацій для досягнення заданої точності. Водночас проводилося моделювання роботи засобу з використанням низки місцевих опорів. Зовнішній вигляд УЗВ з рівними сигнальними шляхами, на базі якого проводилися дослідження в середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation, показано на рис. 4.

Методика досліджень полягала у визначенні низки точок відомих витрат у разі розвинутого турбулентного потоку газу у вузькому діапазоні (з використанням стандартного пристрою підготовки потоку з різними комбінаціями закриття отворів пристрою підготовки потоку), а також у широкому діапазоні витрат (з використанням стандартних гідравлічних опорів) та подальшому визначенні похибки вимірювань для кожної точки.

Отримані результати порівнювалися з похибками відповідних витрат реперних точок із засто-

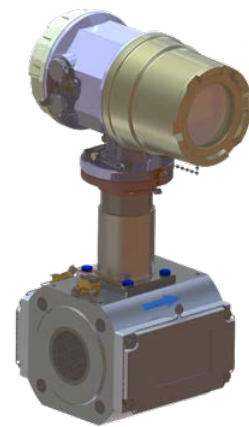


Рис. 2. Зовнішній вигляд УЗВ GFA202 Dn50

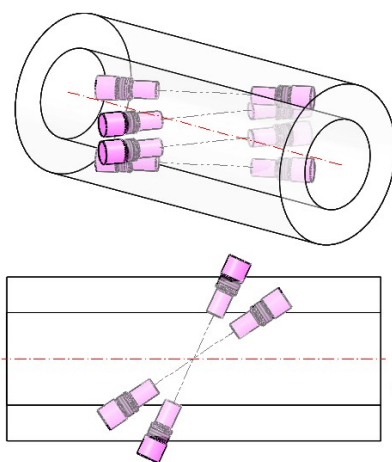


Рис. 3. Схема розташування каналів УЗВ з однаковими сигнальними шляхами

суванням класичного стандартного чотириканального УЗВ.

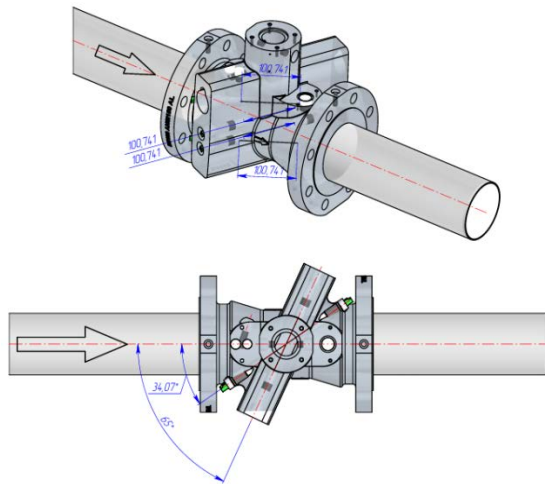


Рис. 4. Зовнішній вигляд УЗВ з рівними сигнальними шляхами, змодельованого в середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation

ної вимірної витрати. На основі застосування методів CFD досліджено зростання похибки вимірювання витрати у разі послідовного закриття отворів підготовки потоку. Це дало змогу встановити залежність коригувального коефіцієнта від еквівалентного та побудувати поліном третього степеня, за допомогою якого для будь-яких витрат у визначеному діапазоні можна отримати коригувальний коефіцієнт і уточнити результати вимірювання [25]. Зазначений процес є індивідуальним для кожного окремого лічильника, оскільки результати щодо витрат на основі поліноміальних залежностей отримуються в реальному часі, цей процес реалізується безпосередньо із залученням систем штучного інтелекту [26]. Методика корекції похибок у реальному часі дозволила знизити похибку вимірювання на 10...15 % у випадку забруднення пристрою підготовки потоку.

Отже, запропонований ітераційний підхід поєднує класичні метрологічні принципи з сучасними цифровими технологіями та штучним інтелектом, що дозволяє створювати вимірювальні системи нового покоління у стислі терміни. Отримані результати проектування окремих складових інформаційно-вимірювальної системи витрати газу із застосуванням ітераційної методології підтверджують її ефективність. Процес проектування зазначених засобів і методик виконувався на основі аналізу поставленої задачі шляхом використання сучасного математичного апарату, CFD-моделювання у середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation, створення експериментального зразка на 3D принтері нового покоління KLEMA PRO, проведення експериментальних досліджень та уточнення складових проекту. Встановлено, що за такого підходу для досягнення поставленої задачі, як показала практика, необхідно 2—5 ітерацій. До того ж в процесі проектування оперативно виявлялися джерела недосконалості вузлів, що дозволяло оптимізувати конструкцію та адаптувати засіб до змінних параметрів середовища.

Методика потребує подальшої апробації на витратомірах більших типорозмірів та у різних умовах експлуатації (високий тиск, змінний склад газу). Перспективним напрямом є інтеграція системи у кіберфізичні середовища та використання хмарних технологій для аналізу вимірювальних даних. Для газорозподільних компаній це означає, що отримання нових засобів через скорочення часу та зменшення витрат на проектування та комерційних втрат, підвищення довіри між постачальниками та споживачами.

Висновки

У роботі проаналізовано сучасний стан і напрями розвитку ультразвукових систем вимірювання витрати газу та визначено основні вимоги до них, зокрема щодо точності, надійності та ефективності застосування.

Запропоновано ітераційну методологію проектування інформаційно-вимірювальних систем витрати газу, яка поєднує CFD-моделювання, експериментальні дослідження та методи штучного інтелекту. Її використання дозволяє узгодити результати математичного моделювання з реальними умовами експлуатації та підвищити достовірність вимірювань.

Показано, що застосування CFD-моделювання та інтелектуальних методів обробки даних забез-

печує можливість оптимізації конструкції витратоміра та зменшення впливу турбулентності потоку.

У результаті реалізації методології розроблено багатоканальний УЗВ газу GFA202 DN50 та запропоновано конструкцію чотириканального витратоміра з однаковими сигнальними шляхами, що дозволило підвищити точність вимірювання та зменшити чутливість до збурень потоку. Розроблено метод корекції результатів вимірювання в умовах забруднення каналу, який базується на використанні калібрувальних даних і поліноміальних залежностей, дозволило зменшити похибку вимірювань у процесі експлуатації. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу та доцільність його застосування для створення сучасних ультразвукових витратомірів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [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. [Electronic resource]. Available: <https://conferences.imeko.org/event/9/contributions/379/attachments/245/>, <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/49830> (ir.lib.vntu.edu.ua in Bing).
- [2] Й. Й. Білинський, і А. А. Стеценко, «Аналіз похибок ультразвукового витратоміра,» Матеріали LIV Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету, (НТКП ВНТУ–2025), зб. доп. Вінниця, ВНТУ, 2025 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/123456789/49902/1/186890.pdf> (ir.lib.vntu.edu.ua in Bing).
- [3] ISO/IEC Guide 98-3:2008. *Uncertainty of measurement, Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. [Electronic resource]. Available: <https://www.iso.org/standard/50461.html#lifecycle>.
- [4] Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», № 1314-VII, 5 черв. 2014. [Electronic resource]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>.
- [5] Закон України «Про ринок природного газу», № 329-VIII, 9 квіт. 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19#Text>.
- [6] Кодекс газорозподільних систем, затв. постановою НКРЕКП №2494, 30 вер. 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text>.
- [7] Технічний регламент засобів вимірювальної техніки, постанова КМУ №163, 24 лют. 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/163-2016-%D0%BF#Text>.
- [8] ISO 17089 Ultrasonic Gas Flowmeters, Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010. [Electronic resource]. Available: <https://www.iso.org/standard/41235.html>.
- [9] OIML R 137 Gas Meters, Gas meters, International Organization of Legal Metrology, Paris, France, 2012. [Electronic resource]. Available: <https://www.oiml.org/en/files/pdf/r137-1-2-e12.pdf>.
- [10] AGA Report No. 9 Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters, American Gas Association, Washington, DC, USA, 2007. Copyright © 1998,2003 American Gas Association All Rights ReserVed. [Electronic resource]. Available: <https://www.scribd.com/document/751776600/AGA-Report-9>.
- [11] ISO 5167 Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003. [Electronic resource]. Available: <https://www.iso.org/standard/28064.html>.
- [12] В. С. Єременко, В. П. Бабак, та ін., *Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем*, підруч., Ред. В. П. Бабак. Київ, Україна: Ун-т новітніх технологій НАУ, 2017, 496 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/items/1d652598-131a-4b44-b3e2-38c8b5582436>.
- [13] Л. В. Передерій, «Системний підхід до захисту інформації в автоматизованих системах,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, с. 56-61, 2012. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nvd.luguniv.edu.ua/archiv/NN6/08plvpis.pdf>.
- [14] J. Wang, Y. Zhao, and X. Li, "The development of ultrasonic flowmeter sensors for mass flow rate measurement: A comprehensive review," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 97, no. 102614, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102614>.
- [15] 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, 2024, Art. no. 1462. <https://doi.org/10.3390/s24051462>.
- [16] L. Sun, K. Zhang, and C. Jiang, "Research and application of ultrasonic gas flow meter performance on-line audit," in *Proc. 19th International Flow Measurement Conference (FLOMEKO)*, Chongqing, China, 2022. [Electronic resource]. Available: <https://www.proceedings.com/content/068/068697webtoc.pdf>.
- [17] J. Chen, K. Zhang, L. Wang, M. Yang, "Design of a High Precision Ultrasonic Gas Flowmeter," *Sensors*, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20030714>.
- [18] M. Billet, "Signal processing techniques for ultrasonic gas flow measurement," *Measurement*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108123>.
- [19] A. Dudzinski, "Integration of ultrasonic flow meters into smart metering systems," *Sensors*, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21072345>.
- [20] IEEE Xplore, *Design of an Ultrasonic Gas Flow Measurement Circuit Based on the Time-Difference Method*, 2020. <https://doi.org/1109/ICEMI.2007.4350505>.
- [21] В. І. Роман, М. І. Бугайчук, і Я. С. Острей, «Методологія застосування штучних нейронних мереж для підвищення точності ультразвукових витратомірів,» *Автоматика та інформаційно-вимірювальна техніка. Наукові праці ВНТУ*, № 2, 2025. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-2-1-10>.
- [22] A. Stetsenko, "Increasing the accuracy of the ultrasonic gas flow information and measurement system by modifying GFA DN50 ultrasonic gas meters, developed using artificial intelligence tools," *Ukrainian Metrological Journal*, № 1, pp.42-46, 2026. ISSN (Online) 2522-1345. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2026.355694>.
- [23] Й. Й. Білинський, і А. А. Стеценко, «Ультразвуковий витратомір з рівними сигнальними шляхами», *МПК G01F 1/00, заявка № u202600090*, дата подання: 06.01.2026, Україна.
- [24] Y. Y. Bilynskiy, and A. A. Stetsenko, "Development and investigation of a fourchannel ultrasonic flowmeter with equal

signal paths,” Polish Journal of Science, № 98, pp. 73-77, 2026. ISSN 3353-2389. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20276780>.

[25] Й. Й. Білинський, і А. А. Стеценко, «Підвищення точності вимірювання витрати природного газу в умовах забруднення струмовипрямляча підготовки потоку,» *Відбір і обробка інформації*, № 53 (129), с. 31-38, 2025. <https://doi.org/10.15407/vidbir2025.53.031>.

[26] Й. Й. Білинський, і А. А. Стеценко, «Розробка методики підвищення точності багатоканального ультразвукового витратоміра,» *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2025»*, Одеса, 30-31 жовтня 2025. с. 378, 379. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/49950/>.

Рекомендована кафедрою загальної фізики ВНТУ

Дата надходження 28.05.2026

Дата прийняття після доопрацювання 6.06.2026

Дата прийняття до друку після рецензування 12.06.2026

Дата публікації 2.10.2026

Білинський Йосип Йосипович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри загальної фізики, e-mail: Yosyp.bilynsky@gmail.com . <http://orcid.org/0000-0002-9659-7221>;

Стеценко Андрій Анатолійович — докторант кафедри загальної фізики, e-mail: andrii.energo@gmail.com . <http://orcid.org/0009-0004-2967-8867>.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Yo. Yo. Bilynskyi¹

A. A. Stetsenko¹

Methodology for Development and Research of Gas Consumption Information and Measurement Systems

¹Vinnitsia National Technical University

The object of the study is the design process of ultrasonic information-measuring systems for determining gas flow rate and the ways to improve measurement accuracy under real operating conditions, which may be characterized by flow turbulence, geometric constraints of pipelines, and contamination of measuring channels. An iterative design methodology is proposed, which combines theoretical analysis of the problem, CFD modeling, device design development, experimental research, and artificial intelligence methods within a closed cycle “model – algorithm – hardware implementation – experiment – correction.” Artificial intelligence plays a significant role in the design process. The application of CFD modeling and intelligent data processing methods makes it possible to optimize the flowmeter design and significantly reduce the design time. The methodology is additionally enriched with local feedback loops, ensuring adaptability and correction at each stage of the design process. The use of such an iterative design model for ultrasonic flowmeters is possible with the availability of specialized equipment and software, which should include: an environment for numerical modeling of gas flows, a 3D printer, embedded computer systems for digital data processing, and test benches for studying the operation of measuring instruments. The application of the proposed methodology made it possible to: develop a flow-stabilizing device for the multi-beam ultrasonic gas meter GFA202 DN50, which allowed combining compact design with high accuracy typical of larger-size meters that meet class 0.5 requirements, although the meter itself belongs to accuracy class 1; create a new design of a four-channel flowmeter with equal signal paths, whose average measurement error does not exceed 0.8 % over a wide flow range, whereas the classical four-channel ultrasonic flowmeter has an error up to 1.3 %; propose a method for correcting gas flow measurement results based on the use of calibration data during calibration and verification of ultrasonic flowmeters. The implementation of the proposed solutions reduced the influence of hydrodynamic disturbances and structural factors on measurement results and improved the accuracy of the flowmeter. The obtained results can be applied in industrial gas transportation systems, particularly under conditions of limited lengths of straight pipeline sections and variable flow modes

Keywords: ultrasonic flowmeter, information and measurement system, iterative methodology, CFD simulation, artificial intelligence, error correction, gas flow.

Bilynskyi Yosyp Yo. — Dr Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of General Physics, e-mail: Yosyp.bilynsky@gmail.com . <http://orcid.org/0000-0002-9659-7221>;

Stetsenko Andrii A. — Doctoral Candidate of the Chair of General Physics, e-mail: andrii.energo@gmail.com . <http://orcid.org/0009-0004-2967-8867>