

УДК 006.01.55

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ОБЛІКУ ГАЗУ ШЛЯХОМ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ГРАДУЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ

Асп. Р. Г. Шипіло, д-р техн. наук С. С. Тимофєєв, магістр В. Б. Катамай,
д-р філософії А. В. Захаров

IMPROVING THE ACCURACY OF GAS METERING THROUGH INDIVIDUAL CALIBRATION OF ULTRASONIC GAS METERS

Postgraduate student R. H. Shipilo, Dr. Sc. (Tech.) S. S. Tymofieiev,
MSc V. B. Katamai, PhD. A. V. Zakharov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358342>



Анотація. У статті досліджено можливості підвищення достовірності обліку природного газу через застосування індивідуального градуювання ультразвукових лічильників. Показано, що наявна практика перевірки та калібрування не враховує індивідуальних метрологічних характеристик конкретного приладу, що може призводити до додаткових втрат або перекручень обліку. Проаналізовано технічні особливості ультразвукових лічильників газу, які допомагають реалізувати програмне градуювання з використанням багатоточкової апроксимації похибок. Запропоновано математичні моделі корекції похибки, зокрема з використанням постійного коефіцієнта, поліномів II–IV порядку та кусково-лінійної апроксимації. Наведено результати експериментальних досліджень і розрахунок середньозважених похибок. Доведено, що індивідуальне градуювання дає змогу знизити невизначеність обліку та забезпечити метрологічну справедливість між постачальником і споживачем газу.

Ключові слова: ультразвуковий лічильник, облік газу, похибка, індивідуальне градуювання, метрологія, точність вимірювання, калібрування.

Abstract: The article investigates the possibilities of improving the accuracy and reliability of natural gas metering through the implementation of individual calibration (graduation) of ultrasonic gas meters. It is emphasized that conventional verification and calibration practices typically do not take into account the specific metrological behavior of each individual device, which may lead to deviations in gas flow accounting and financial discrepancies. The study provides a comprehensive analysis of commercially available ultrasonic gas meters, highlighting their suitability for precise correction using software-based calibration methods.

A comparative overview of regulatory and technical requirements is provided based on Ukrainian and international standards, including ISO 17089 and OIML R 137. Different calibration methodologies were applied to real measurement data obtained from an ultrasonic gas meter of size G650. These methods include constant coefficient correction, second-, third-, and fourth-order polynomial approximations, as well as piecewise linear interpolation.

The experimental section presents the procedure for determining the initial metrological characteristics, computing the weighted mean error (WME), and applying each correction model. Graphs and comparative results demonstrate the improvement in meter accuracy after graduation.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Шипіло Р. Г., Тимофєєв С. С., Катамай В. Б., Захаров А. В., 2026.

It was found that the piecewise linear approximation method most accurately reflects the error distribution across the entire flow range, while polynomial methods offer computational efficiency with reasonable accuracy.

The analysis confirms that individual graduation significantly reduces the measurement uncertainty and ensures high metrological fidelity in gas consumption monitoring. Such procedures are increasingly relevant for commercial metering points, especially under rising energy prices and strict regulatory conditions. The paper concludes that although not mandatory under current Ukrainian legislation, individual calibration is a highly effective and practical tool to achieve fair and transparent gas trade between suppliers and consumers.

Keywords: *ultrasonic gas meter, gas flow measurement, individual calibration, error correction, accuracy, metrological model, weighted mean error.*

Вступ. У сучасних системах обліку природного газу ультразвукові лічильники займають провідне місце завдяки високій точності, стабільності вимірювання, відсутності рухомих частин і низькому гідравлічному опору. Вони застосовуються як на магістральних газопроводах, так і комерційних вузлах обліку в системах газорозподільних мереж. Ультразвукові лічильники газу відіграють важливу роль у сучасних системах обліку споживання газу, забезпечуючи високу точність і надійність вимірювань. Принцип їхньої роботи базований на вимірюванні часу проходження ультразвукових сигналів через потік газу, що дає змогу визначити його швидкість і об'єм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика точного обліку газу широко висвітлена в науковій і технічній літературі. У роботах, присвячених метрології, розглянуто питання повірки, калібрування та сертифікації засобів вимірювання згідно з положеннями технічного регламенту [2, 4]. Стандарти ISO 17089-1 [5] і OIML R 137-1-2 [6] встановлюють вимоги щодо конструкції, точності, стабільності та методів випробування ультразвукових лічильників. Проте в більшості публікацій бракує детального аналізу можливостей індивідуального градуювання, його технічної реалізації та впливу на похибки обліку. Окремі автори акцентують увагу на необхідності поліпшення метрологічного контролю на об'єктах ГТС і ГРМ, однак

вказують на складність практичного впровадження додаткових процедур без відповідної методологічної бази [7].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цього дослідження є підвищення достовірності комерційного обліку природного газу через застосування індивідуального градуювання ультразвукових лічильників, що допомагає враховувати реальні метрологічні характеристики кожного приладу.

Основна частина дослідження. Принцип дії ультразвукових лічильників газу ґрунтований на вимірюванні часу поширення акустичних хвиль у середовищі, що рухається. На рис. 1 зображено структуру ультразвукових лічильників газу.

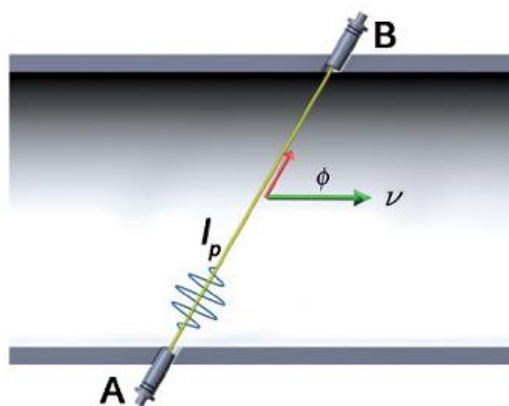


Рис. 1. Конструкція ультразвукових лічильників газу

$$t_{AB} = \frac{l_p}{(c + v \cos \phi)} \quad (1)$$

$$t_{BA} = \frac{l_p}{(c - v \cos \phi)} \quad (2)$$

де l_p – довжина траєкторії, м;
 c – швидкість звуку, м/с;

v – середня швидкість, м/с;
 ϕ – кут нахилу траєкторії, °;
 t_{BA}, t_{AB} – час проходження акустичного імпульсу, с.

Нижче наведено перелік (табл. 1) і, відповідно, короткий аналіз основних моделей ультразвукових лічильників газу, оцінені щодо відповідності і допущені до введення в обіг в Україні.

Таблиця 1

Ультразвукові лічильники газу, оцінені щодо відповідності в призначених органах з оцінювання відповідності (ООВ) і внесені до Реєстру затверджених типів засобів вимірювальної техніки України [1]

УЗЛ	Виробник	ООВ	Номер сертифікату
1	2	3	4
Іноземні виробники			
типу FLOWSIC600 (двопроменевої версії) G100-G1600, Dn 50-Dn 150, класу 1,0	SICK Engineering GmbH (Bergener Ring 27, D-01458 Ottendorf-Okrilla, Germany)	ДП «Івано-Франківськстандарт-метрологія»	UA.TR.055.ST.069-24 версія 1
типу «ECOSONIC X12» DN80-DN600	RMA Mess-und Regeltechnik GmbH & Co. KG. Forsthausstrasse 3. 77866 Rheinau. Germany	ДП «Івано-Франківськстандарт-метрологія»	UA.TR.055.ST.065-23 версія 1
FLOWSIC600-XT...	SICK AG Erwin-Sick-Strasse 1, 79183 Waldkirch, Germany	ДП «Укрметртест-стандарт»	UA.TR.001 115-17 Rev. 1
FLOWSIC500...	SICK AG, Erwin-Sick-Str. 1, 79183 Waldkirch, Germany	ДП «Укрметртест-стандарт»	UA.TR.001 16-18 Rev. 1
FLOWSIC600...	SICK AG, Erwin-Sick-Str. 1, 79183 Waldkirch, Germany	ДП «Укрметртест-стандарт»	UA.TR.001 64-18 Rev. 1
типу USM-GT-400	RMG Messtechnik GmbH, Otto-Hahn Strabe 5, 35510, Butzbach, Німеччина	ДП «Івано-Франківськстандарт-метрологія»	UA.TR.055.ST.058-20 Версія 1

Продовження табл. 1

1	2	3	4
ALTOSONIC V12...	KANEX Krohne Anlagen Export GmbH Ludwig-Krohne-Str. 5, 47058 Duisburg, Germany KROHNE Altometer Kerkeplaat 12, 3313LC Dordrecht, Netherlands	ДП «Укрметртест-стандарт»	UA.TR.001 49-19
Лічильники газу ультразвукові Q.SonicPlus, CheckSonicVX	Elster GmbH Steinern Strasse 19-21, 55252 Mainz-Kastel, Germany Elster NV/SA Rijkmakerlaan 9 B-2910 Essen, Belgium	ДП «Укрметртест-стандарт»	UA.TR.001 8-17
Українські виробники			
ГУВР-011 модифікацій А2 та А4	ПрАТ «ТАХІОН», вул. Ахсарова, буд. 11, кв. 18, м. Харків, 61202, ЄДРПОУ 24487975	ННЦ «Інститут метрології»	UA.TR.113-0134-18 версія 3
типу GFA...	ПрАТ «Енергооблік», 61052, м. Харків, вул. Мала Панасівська, буд. 1. Код ЄДРПОУ 24662711	ДП «Івано-Франківськстандарт-метрологія»	UA.TR.055.ST.061-21 версія 3
Зонд 2 G160-G2500 DN80-DN200	ТОВ «НВП «КУРС», 49000, м. Дніпро, вул. Вокзальна, буд. 1. Код ЄДРПОУ 37212146	ДП «Івано-Франківськстандарт-метрологія»	UA.TR.055.ST.062-22 Версія 2
типу GFA202 із вбудованим пристроєм перетворення об'єму DN50-DN400	ПрАТ «Енергооблік», 61052, м. Харків, вул. Мала Панасівська, буд. 1	ДП «Івано-Франківськстандарт-метрологія»	UA.TR.055.ST.061-21
КУРС-01	ТОВ «Виробничо-комерційна фірма «Курс», вул. Білої 3., буд. 69В, Дніпропетровська обл., м. Новомосковськ, 51200	ДП «Укрметртест-стандарт»	UA.TR.001 286-19

SICK FLOWSIC600 (XT) (Німеччина) – це один із найпоширеніших лічильників у магістральному обліку газу. Його перевагами є модульна конструкція, висока точність і самодіагностика. Пристрій забезпечує вимірювання витрат у широкому діапазоні, має кілька акустичних каналів і стабільну роботу в умовах змін тиску і температури.

RMG Messtechnik GmbH (Німеччина) — один із провідних виробників обладнання для вимірювання та регулювання витрат газу. Ультразвукові лічильники RMG, зокрема серії USM-GT-400, мають надвисоку точність, здатність до самодіагностики та роботи в умовах високого тиску. Їх активно застосовують на магістральних газопроводах і в пунктах комерційного обліку завдяки відповідності найсуворішим вимогам міжнародних стандартів (OIML, MID, ISO).

RMA Mess-und Regeltechnik GmbH (Німеччина) спеціалізується на комплексних рішеннях для обліку та розподілу газу. Її ультразвукові лічильники, як-от RMA Ecosonic X12, мають багатоканальну архітектуру, що підвищує стійкість до турбулентності потоку та знижує похибки зі зміною режимів. RMA відомі високою точністю і надійністю в умовах промислової експлуатації. Вони зручно інтегровані в SCADA-системи та широко застосовувані в автоматизованих системах комерційного обліку.

KROHNE — міжнародна компанія з центром у Німеччині, що виробляє прилади для вимірювання потоків у всіх галузях промисловості. Ультразвукові лічильники серії Altosonic V є високоточними приладами для вимірювання великих об'ємів газу. Завдяки п'яти- або семиканальній технології вимірювання прилади KROHNE забезпечують виняткову точність навіть за нестабільних потоків. Їх часто застосовують у пунктах обліку імпортованого газу, на компресорних станціях і в газотранспортних компаніях. **KROHNE Altosonic V12** (Німеччина) –

один із найінноваційніших ультразвукових лічильників, який має 12 акустичних каналів для підвищення точності вимірювань. Його використовують для обліку газу високого тиску. Пристрій забезпечує детальну діагностику стану потоку та може виявляти асиметрію потоку, турбулентність і наявність домішок.

Elster Q.Sonic (Honeywell, Німеччина/США) – ультразвуковий лічильник, розроблений спеціально для комерційного обліку великих обсягів газу. Завдяки технології багатопроменевого вимірювання та вбудованій функції перевірки точності прилад гарантує надійність результатів навіть у складних умовах потоку.

Ультразвукові газові лічильники українського виробництва, такі як ГУВР, GFA і ЗОНД, знаходять широке застосування на вузлах обліку газу завдяки своїм технічним перевагам, надійності та адаптованості до українських умов експлуатації. Ці прилади працюють за принципом вимірювання часу проходження ультразвукових сигналів через газовий потік, що дає змогу забезпечити точне та безконтактне вимірювання витрат.

Для лічильників типу **ГУВР-011** характерна стабільна робота в широкому діапазоні витрат і тисків. Завдяки високій точності та надійності їх застосовують на промислових вузлах обліку, де важлива безперервність і достовірність вимірювань. Їх просто інтегрувати в існуючі системи обліку, а також вони мають сертифікати відповідності українським стандартам.

Ультразвукові лічильники **GFA** компактні, із низьким енергоспоживанням і сучасною електронікою. Їх легко підключити до систем дистанційного зчитування та автоматизованого обліку, через що вони особливо зручні для газорозподільних компаній. Завдяки високій точності вимірювання за низького тиску GFA часто використовують у комерційних вузлах обліку газу.

Лічильники **ЗОНД 2** — це високотехнологічні прилади, розраховані на тривалий термін служби без втрати точності. Вони оснащені сучасними інтерфейсами для передавання даних, що дає змогу інтегрувати їх у системи диспетчеризації. Завдяки стійкості до змін температури, вологості та забруднення газу ЗОНД ідеальний для експлуатації на магістральних і розподільних газопроводах.

ГУВР, GFA і ЗОНД — це приклади успішних українських розробок у сфері обліку газу, що ефективно заміщують іноземні аналоги. Їх впровадження на вузлах обліку газу допомагає забезпечити точний контроль витрат, зменшити експлуатаційні витрати і підвищити загальну ефективність енергетичних систем.

Особливості застосування ультразвукових лічильників газу, пов'язані з їхніми перевагами:

1. Висока точність — забезпечують мінімальні похибки у вимірюваннях навіть за нестационарних і нестабільних потоків газу.

2. Безконтактний метод вимірювання — відсутність рухомих частин знижує знос і потребу в технічному обслуговуванні.

3. Широкий діапазон витрат — дає змогу вимірювати як малі, так і великі витрати газу.

4. Стійкість до агресивного середовища — не чутливі до забруднень, пилу, вологи. Крім того, ряд виробників декларують стійкість їхніх лічильників до водню та газководневих сполук.

5. Можливість дистанційного моніторингу — сумісність із сучасними системами телеметрії та автоматизованими системами обліку.

6. Сертифікація за національними стандартами — повністю відповідають вимогам стандартів ДСТУ і нормативам НКРЕКП, зокрема Кодексам ГТС і ГРМ [2, 3].

Усі зазначені моделі, що використовують у сфері комерційного обліку, оцінюють щодо відповідності

Технічному регламенту засобів вимірювальної техніки № 163 [4], що забезпечує їх офіційне застосування на території України.

Процедура оцінювання відповідності починається з подання виробником (або уповноваженим представником) повного пакета технічної документації до органу з оцінювання відповідності. Документація має містити опис конструкції, принципу дії, програмного забезпечення, технічні характеристики, результати внутрішніх випробувань, а також опис методів калібрування та метрологічного контролю. Особливу увагу приділяють стабільності вимірювання за різних умов, оскільки ультразвукові лічильники можуть працювати в широкому діапазоні температур, тиску та швидкості потоку.

Наступним етапом є **випробування для перевірки типу** в незалежній акредитованій лабораторії, під час яких перевіряють точність лічильника, його стійкість до зовнішніх впливів, електромагнітну сумісність, надійність в умовах турбулентного потоку та впливу домішок у газі. Ультразвукові лічильники мають продемонструвати відповідність вимогам щодо максимально допустимої похибки в межах, встановлених Технічним регламентом для класу 1,0.

Залежно від типу продукції виробник може вибрати один із кількох **модулів оцінювання відповідності**: найчастіше застосовують модулі **В (перевірка типу)** у поєднанні з **Д (забезпечення якості виробництва)** або **Ф (перевірка відповідності продукції)**. У разі позитивного результату орган з оцінювання відповідності видає **сертифікат відповідності**, після чого лічильник може бути **внесений до Реєстру затверджених типів засобів вимірювальної техніки України**.

Після внесення до реєстру засіб вимірювальної техніки отримує дозвіл на використання у сфері, що підлягає державному метрологічному контролю. Це

дає змогу застосовувати ультразвукові лічильники в комерційному обліку газу, у тому числі на вузлах обліку газорозподільних і газотранспортних компаній.

Отже, процедура оцінювання відповідності є комплексною, технічно обґрунтованою та спрямованою на захист інтересів споживачів і держави. Вона гарантує, що всі лічильники, які потрапляють на ринок, є точними, безпечними та надійними протягом усього терміну експлуатації.

Оцінювання відповідності ультразвукових лічильників газу в Україні базовано на положеннях Технічного регламенту ЗВТ, заснованих на міжнародних і національних нормативних документах. Основними доказовими джерелами для підтвердження відповідності є ДСТУ ISO 17089-1:2021 [5] і ДСТУ OIML R 137-1-2:2018 [6], які встановлюють вимоги щодо ультразвукових лічильників, що використовують для комерційного обліку природного газу.

ДСТУ ISO 17089-1 — це гармонізована версія міжнародного стандарту ISO 17089-1, яка визначає технічні та метрологічні вимоги щодо ультразвукових витратомірів. У документі регламентовано вимоги щодо конструкції, діапазонів вимірювань, класів точності, стабільності, а також методів калібрування і випробувань приладів.

ДСТУ OIML R 137-1-2 є перекладом та адаптацією рекомендацій Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML), які мають статус обов'язкових документів у багатьох країнах. Цей стандарт містить вимоги щодо метрологічних характеристик, умов експлуатації, методів перевірки відповідності та класифікації засобів вимірювання для обліку газу, зокрема вимог щодо класів точності 1,0 та 1,5.

Зазначені документи є технічною основою для проведення типових

випробувань, а також ухвалення рішень органами з оцінювання відповідності. Вони забезпечують уніфікований підхід щодо оцінювання якості та надійності ультразвукових лічильників, сприяють взаємному визнанню результатів метрологічних процедур і узгодженню з європейськими нормами.

Отже, використання ДСТУ ISO 17089 і ДСТУ OIML R 137 як доказової бази дає змогу гарантувати технічну обґрунтованість і міжнародну сумісність підходів щодо сертифікації та експлуатації ультразвукових лічильників газу в Україні.

У сфері вимірювання витрат і об'єму газу особливої актуальності набуває питання **індивідуального градуювання** ультразвукових лічильників. Попри те, що ця процедура не є обов'язковою, за українським законодавством, її все частіше застосовують у практиці відповідальних операторів газових мереж, орієнтованих на точність, стабільність і відповідність європейським підходам. У цій статті розглянемо відмінність градуювання від випробування, повірки і калібрування, а також обґрунтуємо необхідність проведення індивідуального градуювання.

Зобразимо у вигляді таблиці особливості кожної з метрологічних процедур (табл. 2).

Повірка: обов'язковий державний контроль

За вимогами Технічного регламенту ЗВТ, **повірка** є обов'язковою процедурою для всіх засобів вимірювальної техніки, які застосовують у сфері комерційного або державного обліку. Повірка підтверджує, що засіб відповідає встановленим метрологічним характеристикам і може бути використаний протягом визначеного міжповірочного інтервалу. Повірка не передбачає внесення жодних змін до приладу — лише перевірку параметрів щодо відповідності допустимим межам.

Таблиця 2

Порівняння процедур випробування – повірки – калібрування – градування

Критерій	Випробування	Повірка	Калібрування	Індивідуальне градування
Обов'язковість	Обов'язкова для законодавчо регульованих ЗВТ	Обов'язкова для законодавчо регульованих ЗВТ	Добровільна	Добровільна, часто ініційована замовником
Мета	Підтвердження Технічному регламенту	Підтвердження відповідності встановленому класу точності	Визначення фактичних метрологічних характеристик	Створення індивідуальної метрологічної моделі
Типовий результат	Протокол випробувань	Свідоцтво про повірку з умовами використання	Сертифікат калібрування	Поліном/таблиця поправок, що враховують для експлуатації
Умови виконання	Атмосферний / робочий тиск (лабораторні умови)	Атмосферний тиск (лабораторні умови)	Атмосферний тиск / робочий тиск	Атмосферний / робочий тиск (до 50–65 бар)
Кількість точок вимірювання	Від 7 до 20 і більше, по всьому діапазону витрат	Зазвичай тричотири (сім для ультразвукових лічильників)	Від 3 до 10	Від 7 до 20 і більше, по всьому діапазону витрат
Корегування приладу	Не передбачено	Не передбачено	Не передбачено	Так, програмне або апаратне внесення поправок
Частота проведення	Для введення на ринок	Згідно з міжповірочним інтервалом	За необхідності	Періодично, після повірки або калібрування

Калібрування: добровільна, але цінна процедура

Калібрування на еталонних установках: калібрування на спеціалізованих стендах (установках), які відтворюють умови експлуатації, для визначення похибок (відхилень) і невизначеності вимірювання:

- визначення характеристик потоку: аналіз впливу профілю потоку, турбулентності та інших факторів на точність вимірювань;

- діагностика та контроль;

- перевірка електронних компонентів: оцінювання працездатності ультразвукових перетворювачів та електронних систем лічильника.

Умови калібрування. Під час калібрування ультразвукових лічильників газу необхідно дотримуватися певних умов, щоб забезпечити точність і повторюваність результатів:

- температурний режим: підтримання стабільної температури в приміщенні, де відбувається калібрування, оскільки температурні коливання можуть впливати

на характеристики лічильників і точність вимірювань;

- тиск і вологість: контроль і підтримання стабільного тиску та вологості газу, що проходить через лічильник, відповідно до стандартних умов;

- стабільність потоку витрат газу: забезпечення рівномірного і стабільного потоку газу через лічильник під час калібрування для отримання достовірних результатів;

- використання еталонних засобів: застосування еталонних лічильників та обладнання, що можна простежити до національних еталонів, для порівняння та визначення похибок.

Обладнання для калібрування.

Калібрують на еталонних установках, які мають простежуваність до національних еталонів України, що гарантує максимальну точність, мінімальне значення невизначеності та відповідність міжнародним стандартам. Зараз в Україні створено комплекс національних первинних, вторинних і робочих еталонів, які зберігають у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» і мають найвищі метрологічні характеристики в діапазоні об'ємних витрат газу від 0,001 до 25000 м³/год [7].

На відміну від повірки, **калібрування є добровільною процедурою**, яка полягає у визначенні фактичних метрологічних характеристик приладу без ухвалення рішення про його придатність. За результатами калібрування користувач отримує сертифікат із конкретними числовими значеннями відхилень, які можна враховувати для подальших розрахунків. У багатьох технологічних процесах, де потрібна підвищена точність (наприклад контроль якості або в лабораторіях), калібрування є бажаною процедурою.

Індивідуальне градуювання: ключ до максимальної достовірності

Індивідуальне градуювання — це розширена форма калібрування, яка

передбачає визначення **індивідуальної характеристики кожного конкретного лічильника** на основі багатоточкових вимірювань. У процесі градуювання створюють апроксимаційну модель похибки або поліном, який точно описує поведінку приладу в усьому робочому діапазоні витрат і тисків. Цей підхід дає змогу суттєво зменшити невизначеність обліку та підвищити довіру між постачальником і споживачем газу.

На відміну від стандартної повірки, градуювання не просто «перевіряє», а **вимірює і корегує** як апаратно, так і програмно. Ультразвукові лічильники, зокрема багатопроменеві, допомагають реалізовувати градуювання за допомогою внутрішнього програмного забезпечення, адаптуючи алгоритм обробки сигналів до індивідуальних особливостей приладу.

Процес градуювання лічильників відбувається відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO 17089-1 та експлуатаційної документації приладу. Процедура градуювання включає перевірку метрологічних характеристик лічильника, визначення похибок вимірювання та їх корегування. Під час калібрування ультразвукового лічильника газу необхідно дотримуватися певних умов температури, тиску та вологості. Відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO 17089-1 та інструкцій з експлуатації процес градуювання включає такі основні етапи.

Підготовка до градуювання.

Ультразвуковий лічильник газу монтують на еталонну установку, після чого перевіряють герметичність і контролюють витоки, щоб забезпечити його правильну роботу.

Процедура градуювання:

1. Визначення метрологічних характеристик лічильника. На цьому етапі проводять серію вимірювань у різних точках діапазону витрат, щоб оцінити точність приладу та виявити характер відхилень.

2. Розрахунок середньозваженої похибки. На основі отриманих результатів вимірювань обчислюють середньозважену похибку, яка враховує вплив кожної точки в діапазоні на загальну точність обліку.

3. Градування одним із методів, залежно від характеру відхилень:

а) постійний коефіцієнт: застосовують, якщо похибка стабільна по всьому діапазону;

б) поліном: використовують у випадку плавного нелінійного відхилення,

можна побудувати корегувальний поліном (наприклад II, III або IV порядку);

в) кусково-лінійна апроксимація: ефективна за наявності ділянок із різною поведінкою похибки, де точність краще забезпечити розділенням діапазону на інтервали з окремими коефіцієнтами.

У табл. 3 і на рис. 2 наведені реальні метрологічні характеристики ультразвукового лічильника газу типорозміру G650. На його прикладі проведемо градування для всіх доступних методів та оцінимо результати такої процедури.

Таблиця 3

Результати дослідження ультразвукового лічильника газу типорозміру G650

Об'ємні витрати, м ³ /год	4,1 Q _{min}	50,4 0.05Q _{max}	98,1 0.1Q _{max}	253,7 0.25Q _{max}	402,2 0.4Q _{max}	697,4 0.7Q _{max}	997,6 Q _{max}
Похибка, %	1,10	0,1	-0.65	-0.31	-0.31	-0.78	-0.77

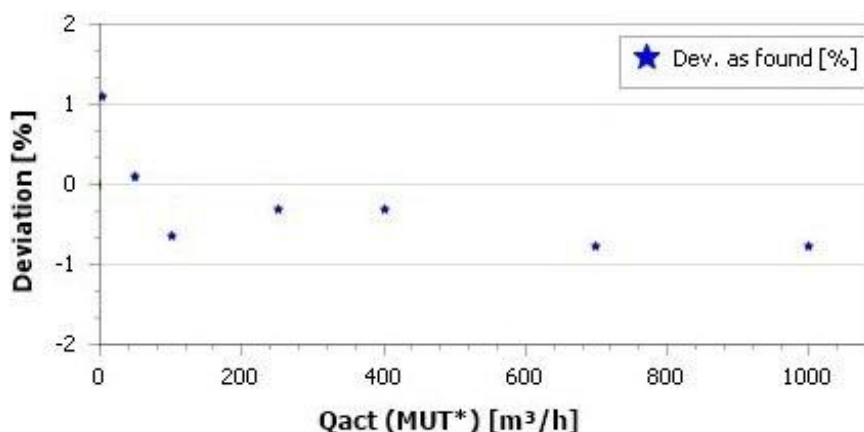


Рис. 2. Отримані значення метрологічних характеристик ультразвукового лічильника

Для градування методом постійного коефіцієнта необхідно розрахувати середньозважену похибку (WME):

$$WME = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (3)$$

де δ – основна відносна похибка лічильника, що повіряють, %;

q_i – значення об'ємних витрат газу, на якому проводять повірку;

$$k_i = \frac{q_i}{q_{max}}, \text{ якщо } q_i \leq 0,7 q_{max};$$

$$k_i = 1.4 - \frac{q_i}{q_{max}}, \text{ якщо } 0,7 q_{max} < q_i \leq q_{max}.$$

Для отриманої метрологічної характеристики лічильника газу розраховане значення WME складає $-0,628$. Проведемо градування методом постійного коефіцієнта AF (рис. 3),

розрахунок якого здійснюється за формулою

$$AF = \frac{1}{1 + \frac{WME}{100\%}} = 1.00632. \quad (4)$$

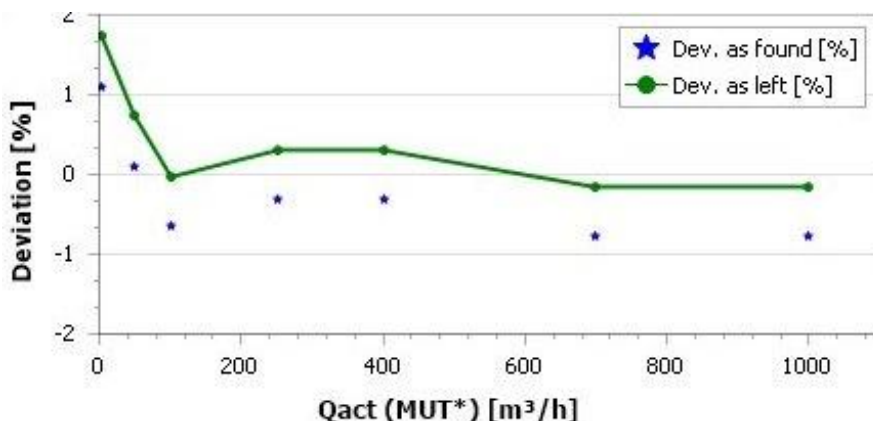


Рис. 3. Характеристика ультразвукового лічильника після градування методом постійного коефіцієнта

Наступний метод калібрування полягає в застосуванні поліноміальної корекції. Залежно від кількості точок визначення метрологічних характеристик в діапазоні від Q_{min} до Q_{max} вибирають порядок полінома. Зокрема, градування

можна здійснювати із застосування полінома II, III або IV порядку.

Наведемо розрахунок полінома II порядку для градування із значенням метрологічних характеристик для п'яти точок (рис. 4).

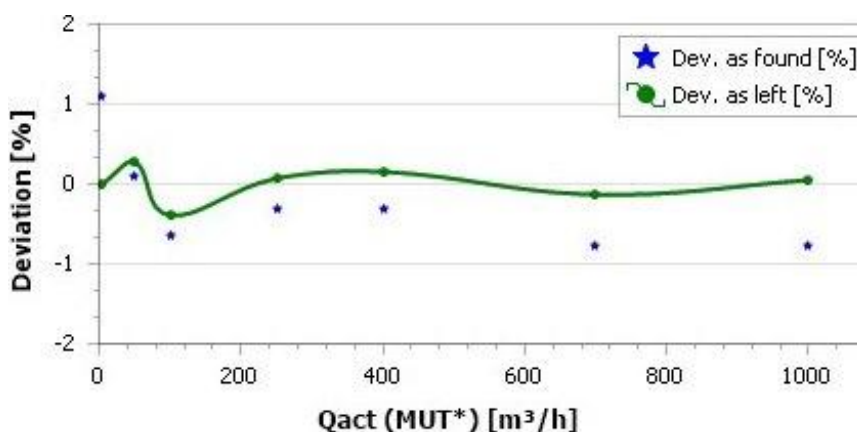


Рис. 4. Характеристика ультразвукового лічильника після градування із застосуванням полінома II порядку

Формула градувального полінома

$$(Q1) = a_{-1}Q^{-1} + a_0 + a_1Q. \quad (5)$$

Коефіцієнти полінома: $a_{-1} = -5,41693 \cdot 10^{-2}$,
 $a_0 = 1,002557$,
 $a_1 = 5,6937 \cdot 10^{-6}$.

Наступним наведемо розрахунок полінома III порядку для градування із значенням метрологічних характеристик для шести точок (рис. 5).

Формула градувального полінома

$$(Q2) = a_{-1}Q^{-1} + a_0 + a_1Q + a_2Q^2. \quad (6)$$

Коефіцієнти полінома: $a_{-1} = -6,40215 \cdot 10^{-2}$,
 $a_0 = 1,001367$,
 $a_1 = 2,4694 \cdot 10^{-6}$,
 $a_2 = 3,7113 \cdot 10^{-9}$.

Останній варіант передбачає застосування полінома III порядку для градування із значенням метрологічних характеристик для семи точок (рис. 6).

Формула градувального полінома

$$(Q3) = a_{-2}Q^{-2} + a_{-1}Q^{-1} + a_0 + a_1Q + a_2Q^2. \quad (7)$$

Коефіцієнти полінома: $a_{-2} = -3,5671 \cdot 10^{-1}$,
 $a_{-1} = -3,0996 \cdot 10^{-2}$,
 $a_0 = 1,000888$,
 $a_1 = 3,8548 \cdot 10^{-6}$,
 $a_2 = 2,7441 \cdot 10^{-9}$.

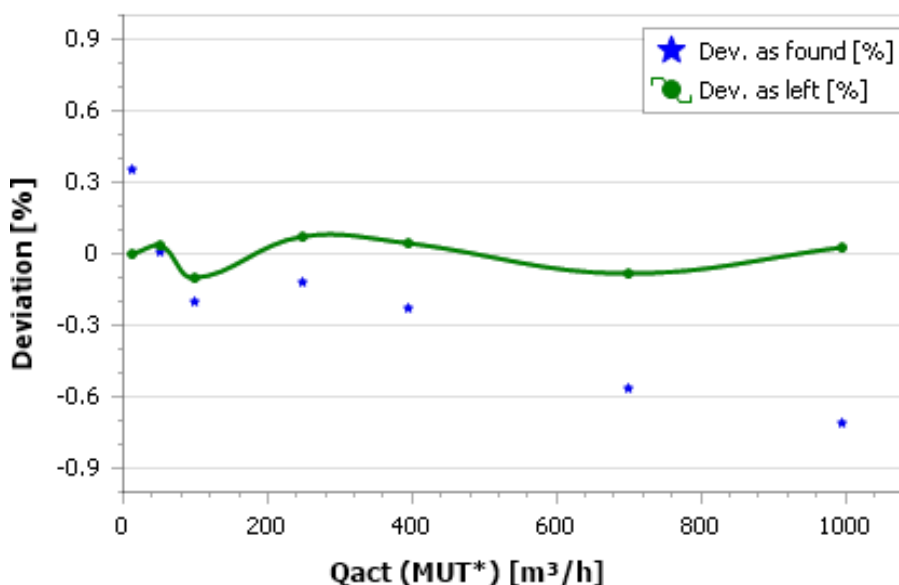


Рис. 5. Характеристика ультразвукового лічильника після градування із застосуванням полінома III порядку

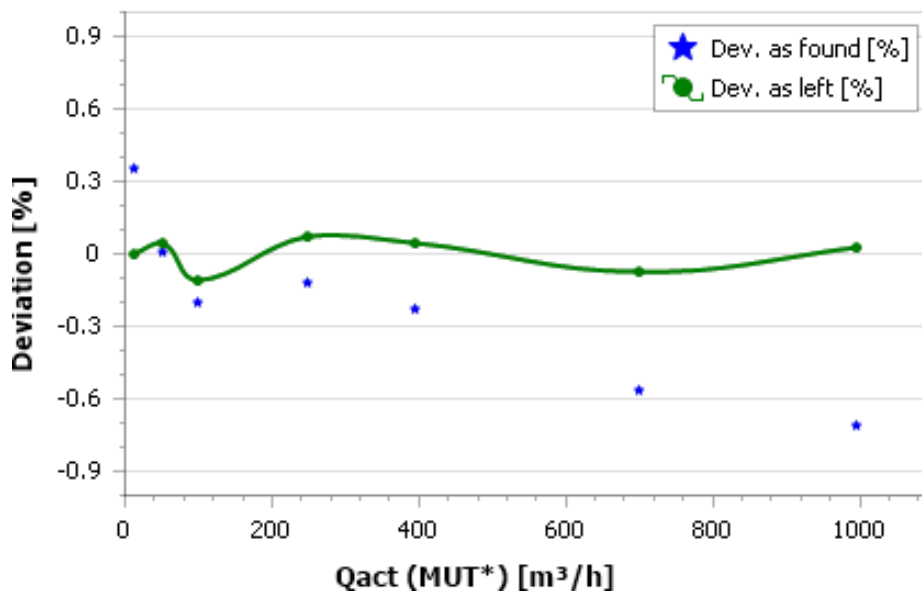


Рис. 6. Характеристика ультразвукового лічильника після градуювання із застосуванням полінома IV порядку

Останній метод градуювання передбачає застосування кусково-лінійної апроксимації, тобто характеристика лічильника описана набором лінійних

прямих (рис. 7). При цьому розрахункова характеристика лічильника виражена горизонтальною лінією.

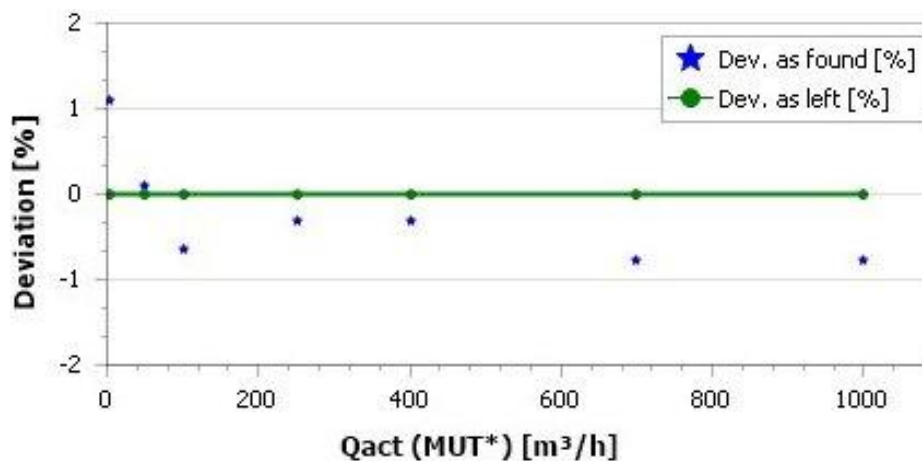


Рис. 7. Характеристика ультразвукового лічильника після градуювання із застосуванням кусково-лінійної апроксимації

Процедури градуювання із застосуванням методу постійного коефіцієнта і поліноміальної корекції

призначені для «зміщення» та «опису» характеристики залежності похибок лічильника. Причому за недостатньої

кількості точок або суттєвих змін значення похибки поліном може «не описати» усі точки, і відхилення від реальних значень можуть бути суттєвими. А процедура градування методом кусково-лінійної апроксимації призначена для «нівельювання» відхилення та максимального «згладження» характеристики лічильника.

Після процедури градування повторно визначають метрологічні характеристики лічильника газу для контролю правильності градування та розраховують середньозважену похибку WME. Звичайно, реальне значення повторно отриманої характеристики буде відрізнятися від теоретично-розрахованої, проте відхилення будуть складати мінімальні значення, а середньозважена похибка буде максимально близькою до

нульового значення, що у свою чергу гарантує максимальну достовірність обліку без надання переваги будь-якій комерційній стороні.

Висновки. Попри те, що в українській практиці індивідуальне градування не є обов'язковим, воно поступово входить в усталену практику великих операторів і компаній, що прагнуть зменшити власні втрати. В умовах зростання цін на енергоресурси і вимог щодо прозорості обліку **індивідуальне градування може бути обов'язковою процедурою**, причому ініціатором цього процесу будуть контрагенти і власники вузлів обліку газу. У результаті процедура градування забезпечить не лише метрологічну, а і комерційну точність у ланцюжку поставки газу.

Список використаних джерел

1. Реєстр затверджених типів засобів вимірювальної техніки України. URL: <https://legalzvt.kiev.ua/>.
2. Кодекс газотранспортної системи: затв. Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 30.09.2015 р. № 2493. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text>.
3. Кодекс газорозподільних систем: затв. Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 30.09.2015 р. № 2494. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text>.
4. Технічний регламент засобів вимірювальної техніки: затв. Постановою Кабміну від 24.02.2016 р. № 163. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/163-2016-%D0%BF#Text>.
5. ДСТУ ISO 17089-1:2021. Вимірювання потоку плинного середовища в закритих каналах. Ультразвукові лічильники газу. Ч. 1. Лічильники для комерційного обліку та вимірювання в газорозподільчих системах (ISO 17089-1:2019, IDT).
6. ДСТУ OIML R 137-1-2:2018. Лічильники газу. Ч. 1. Метрологічні й технічні вимоги; ч. 2. Методи підтвердження метрологічних і технічних характеристик (OIML R 137-1-2:2014, IDT).
7. Малісевич В. В., Середюк Д. О., Пелікан Ю. Т., Катамай В. Б. (2024). Проведення метрологічних досліджень лічильників газу в діапазоні об'ємної витрати газу до 25 000 м³/год в рамках енергетичної безпеки України. *Методи та прилади контролю якості*, № (2(53)). С. 33–45. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-33-45](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-33-45).

References

1. Reiestr zatverdzhenykh typiv zasobiv vymiriualnoi tekhniky Ukrainy [Register of approved types of measuring instruments of Ukraine]. Retrieved from: <https://legalzvt.kiev.ua/> [in Ukrainian].

2. Kodeks hazotransportnoi systemy: zatv. Postanovoiu Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh vid 30.09.2015 r. № 2493 [Gas Transportation System Code: approved by Resolution of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors No. 2493 of September 30, 2015]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text> [in Ukrainian].

3. Kodeks hazorozpodilnykh system: zatv. Postanovoiu Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh vid 30.09.2015 r. № 2494 [Code of Gas Distribution Systems: approved by Resolution of the National Commission for State Regulation in the Spheres of Energy and Utilities No. 2494 of September 30, 2015]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text> [in Ukrainian].

4. Tekhnichnyy rehlement zasobiv vymiryuval'noyi tekhniky: zatv. Postanovoyu Kabminu vid 24.02.2016 r. № 163 [Technical regulations for measuring instruments: approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 24.02.2016 No. 163]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/163-2016-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].

5. DSTU ISO 17089-1:2021. Vymiryuvannya potoku plynnoho seredovyscha v zakrytykh kanalakh. Ul'trazvukovi lichyl'nyky hazu. CH. 1. Lichyl'nyky dlya komertsynoho obliku ta vymiryuvannya v hazorozpodil'nykh systemakh (ISO 17089-1:2019, IDT) [DSTU ISO 17089-1:2021. Measurement of fluid flow in closed channels. Ultrasonic gas meters. Part 1. Meters for commercial metering and measurement in gas distribution systems (ISO 17089-1:2019, IDT)] [in Ukrainian].

6. DSTU OIML R 137-1-2:2018. Lichyl'nyky hazu. CH. 1. Metrolohichni y tekhnichni vymohy; ch. 2. Metody pidtverdzhennya metrolohichnykh i tekhnichnykh kharakterystyk (OIML R 137-1-2:2014, IDT) [DSTU OIML R 137-1-2:2018. Gas meters. Part 1. Metrological and technical requirements; Part 2. Methods of confirmation of metrological and technical characteristics (OIML R 137-1-2:2014, IDT)] [in Ukrainian].

7. Malisevych, V. V., Seredyuk, D. O., Pelikan, YU. T., Katamay, V. B. (2024). Provedennya metrolohichnykh doslidzen' lichyl'nykiv hazu v diapazoni ob'yemnoyi vytraty hazu do 25 000 m³/hod v ramkakh enerhetychnoyi bezpeky Ukrayiny [Conducting metrological studies of gas meters in the range of gas volume flow up to 25,000 m³/h within the framework of energy security of Ukraine]. *Methods and devices for quality control*, No. (2(53)). Pp. 33–45. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-33-45](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-33-45) [in Ukrainian].

Шипіло Руслан Геннадійович, аспірант, кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-4612-4116. E-mail: Shypili_phd@kart.edu.ua.

Тимофєєв Сергій Сергійович, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1980-9841.

Тел.: +38 (050) 653-53-32. E-mail: timofeev_ss@kart.edu.ua.

Катамай Владислав Богданович, магістр, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; інженер із метрології випробувальної лабораторії центру наукового забезпечення ДП «Івано-Франківськстандартметрологія». ORCID iD: 0009-0000-0724-3943. E-mail: ifstandartmetrology@gmail.com.

Захаров Андрій Вадимович, доктор філософії (PhD), кафедра сервісної інженерії та технології матеріалів у машинобудуванні імені О. І. Сідашенка, Державний біотехнологічний університет. ORCID iD: 0000-0001-9894-7355. Тел.: +38 (066) 083-89-47. E-mail: zakharovandrey1997@gmail.com.

Shypilo Ruslan, postgraduate student, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-4612-4116. E-mail: Shypili_phd@kart.edu.ua.

Timofeev Serhii, Dr. Sc. (Tech.), Professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1980-9841. Tel.: +38 (050) 653-53-32.

E-mail: timofeev_ss@kart.edu.ua.

Katamai Vladyslav, Master, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; Metrology Engineer, Testing Laboratory of the Scientific Support Center, SE «Ivano-Frankivskstandartmetrology». ORCID iD: 0009-0000-0724-3943. E-mail: ifstandartmetrology@gmail.com.

Zakharov Andrii, PhD, O. I. Sidashenko Department of Service Engineering and Materials Technology in Mechanical Engineering, State Biotechnological University. ORCID iD: 0000-0001-9894-7355. Tel.: +38 (066) 083-89-47. E-mail: zakharovandrey1997@gmail.com.

Дата надходження статті 17.12.2025 р.

Дата прийняття статті до друку 16.02.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 4.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.