

УДК 621.121.089.6

АЛГОРИТМ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА КОНТРОЛЮ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧИХ ЕТАЛОНІВ ОБ'ЄМУ ГАЗУ

© Петришин І.С., 2001
Івано-Франківський ДЦСМС

На основі аналізу метрологічних характеристик робочих еталонів об'єму газу (лічильників) за результатами їх періодичної повірки запропонований новий алгоритм їх досліджень та контролю.

Однією з важливих робіт в метрологічному забезпеченні обліку природного газу є передача розмірів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу від Державного та вихідних еталонів до робочих засобів виміральної техніки (ЗВТ) - лічильників газу. При передачі розмірів одиниць поряд з підвищенням вимог до точності вимірювань зростає число ЗВТ, для яких шляхом метрологічної атестації (МА) виконується індивідуальне градування. Цей метод дає мінімальні втрати точності і в багатьох випадках є єдиноможливим, особливо при передачі одиниць об'єму від дзвонових витратовимірвальних установок (Державного та вихідних еталонів) до робочих еталонів (РЕ), в ролі яких застосовуються індивідуально відградувані та атестовані робочі лічильники газу турбінного, роторного та барабанного типів.

В Івано-Франківському ДЦСМС розроблена програма і методика метрологічної атестації лічильників газу з метою використання їх як РЕ, досвід застосування яких на протязі останніх років виявив ряд недоліків. Це частіше всього проявляється при черговій повірці РЕ і виражається, насамперед, в зміні таких якісних показників, як стабільність та відтворюваність результатів вимірювань.

На думку автора це відбувається за наступних причин:

1) в програмі МА, яка базується на методи багаторазових спостережень, при обробці результатів приймається, що одиничні спостереження позбавлені систематичної складової похибки, так як всі вони належать одній генеральній сукупності. При цьому передбачено проводити 16 спостережень для кожної контрольної витрати в робочому діапазоні вимірювань (процес вимірювання для кожної витрати неперервний в часі) і далі результати обробляють з метою визначення границі допустимої випадкової похибки РЕ, що характеризується середньоквадратичним відхиленням δ . За систематичну складову приймаються похибки ЗВТ, за допомогою яких проводяться опосеред-

ковані вимірювання фізичних величин, що входять в рівняння газового стану та часу, за який контрольний об'єм пропускається через лічильник.

На практиці похибки одиничних спостережень, як правило, мають систематичну складову, яку необхідно враховувати і оцінити. Оцінка може бути проведена методом дисперсійного аналізу [1]. З цією метою пропонується всю сукупність результатів спостережень для кожної витрати всього діапазону вимірювань розділити на декілька серій, які проводити в різні інтервали часу. Інтервали повинні плануватись так, щоб кожна серія мала не менше п'яти спостережень. Якщо число вимірювань на кожній точці діапазону шкали при МА РЕ згідно методики атестації складало 16, то число серій буде 3. Для того, щоб серії проводились в різні інтервали часу, пропонується послідовно на кожній контрольній точці діапазону вимірювань провести по 5 спостережень, потім повторити таку процедуру ще два рази (в третій серії провести по 6 спостережень). Ці результати дозволять обчислити дві оцінки дисперсії випадкової величини X : в середині кожної серії S_1^2 і міжсерійну S_2^2 . Якщо всі серії належать одній генеральній сукупності і систематичні похибки відсутні, то згідно визначення розподілу $F = S_2^2 / S_1^2$ в залежності від його величини з довірою ймовірністю $P = 99\%$ або $P = 95\%$ можна знайти з допомогою таблиць [1] границі значень, для яких підтверджується ця гіпотеза;

2) при МА проводиться індивідуальне градування РЕ, результати якого подаються у вигляді таблиці значень для окремих точок діапазону вимірювань без додаткової обробки результатів в інших точках цього діапазону, тобто не аналізується градувальна характеристика (ГХ) в цілому. При побудові ГХ у вигляді таблиці проводяться багаторазові спостереження на наборі контрольних точок діапазону вимірювань і безпосередньо використовують отримані оброблені дані. В цьому випадку

похибка ГХ в точці визначається лише похибками вхідної і вихідної величини в даній точці. При побудові ГХ в аналітичному (або графічному з інтерполяцією) виді додатково обробляють набір експериментальних даних (X_i, Y_i) , $i = 1 \dots m$, де m – число точок діапазону, в яких виконують градування. Тоді похибка ГХ в точці залежить від похибок вимірювань вхідних і вихідних величин у всіх точках (X_i, Y_i) , $i = 1 \dots m$ діапазону вимірювань.

РЕ об'єму газу виготовлені на базі лічильників, що серійно випускаються, і із-за відсутності в них лічильного механізму, по своїй суті належать до класу вимірювальних перетворювачів (ВП), основною метрологічною характеристикою яких є істинна (дійсна) функція перетворення $y = f_i(x)$, де x і y – вхідна і вихідна величини. Для ВП задають номінальну функцію перетворення $y = f_n(x)$ або на основі експериментальних даних будують індивідуальну ГХ $f_z(x)$. Основна похибка ВП визначається як різниця між номінальною функцією перетворення (або індивідуальною ГХ) та істинною (дійсною) функцією перетворення :

$$\Delta = f_n(x) - f_i(x) = f_z(x) - f_i(x).$$

Знайти істинне значення функції неможливо, тому задача зводиться до знаходження її оцінок, що представляють собою найкращі приближення до істинних значень. Одним із найбільш поширених методів оцінок істинних значень вимірювальної величини є метод найменших квадратів, згідно якого оцінку вибирають так, щоб мінімізувати суму квадратів залишкових похибок, які визначаються як різниця між істинним значенням і найкращим приближенням до нього.

Так як вихідні сигнали РЕ об'єму суттєво залежать не тільки від вимірювального об'єму газу, що через них протікає, а також від умов вимірювання, властивостей робочого середовища, то для них відсутнє поняття номінальна функція перетворення $f_n(x)$. Тому виникає питання: яку метрологічну характеристику замість основної похибки необхідно нормувати для індивідуально відградуваного РЕ?

В [2] наводиться доцільність нормування в нормативних документах на індивідуально відградувані ЗВТ (взаємні характеристики основної похибки) таких характеристик:

границі допустимих значень середньо-квадратичного відхилення вихідного сигналу, що характеризує випадкову похибку індивідуальної ГХ; найбільше допустиме відхилення вихідних сигналів за встановлений інтервал часу.

Вказані дві характеристики повинні контролюватись при періодичній повірці РЕ. При МА повинен додатково досліджуватись також фактор

апроксимаційної залежності, суть якого полягає в наступному.

Дійсна функція перетворення $f_i(x)$ даного екземпляру РЕ в момент вимірювання t може відрізнитись від індивідуальної ГХ $f_z(x)$ внаслідок неточності її встановлення при градуванні, проведеному попередньо в момент часу t_0 , а також нестабільності за проміжок часу $t-t_0$.

Неточність встановлення ГХ при градуванні визначається в основному не індивідуальними особливостями кожного екземпляру, а загальними метрологічними властивостями ЗВТ даного типу (в нашому випадку лічильниками роторного, турбінного та барабанного типів), тобто відмінностями між видом дійсної функції перетворення та її прийнятою апроксимацією. Вплив цього фактору може бути зведено до мінімуму вибором відповідного виду функції $f_z(x)$.

Найбільш бажаною для РЕ об'єму газу є лінійна функція перетворення $y = a + vx$, де a – вільний член функціональної залежності, v – коефіцієнт перетворення. Для лінійного перетворення можна вказувати похибку коефіцієнта перетворення $\Delta_v = v_n - v$, де, v_n – номінальний (градувальний) коефіцієнт перетворення.

Розглянемо приклад побудови ГХ $y = a + bx$ на основі експериментальних даних (X_i, Y_{ij}) , $i=1 \dots m$, де X_i – відомі величини, що поступають на вхід ВП; Y_{ij} – результати багатократних спостережень в точці Y_i на виході ВП; m – число точок діапазону, в яких виконується вимірювання; $j = 1 \dots n_i$, n – число спостережень в i – й точці.

При побудові лінійної ГХ методом найменших квадратів шукану пряму можна подати у вигляді:

$$y = a_0 + b(X - \bar{X}), \quad (1)$$

де \bar{X} – середнє значення вхідних величин X_i , яке вираховується за такою формулою:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m n_i X_i, \quad (2)$$

де $N = \sum_{i=1}^m n_i$ – загальна кількість результатів. (3)

$$\text{Позначимо через } \bar{Y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} \quad (4)$$

результат вимірювання в точці y_i .

Оцінки коефіцієнтів ГХ методом найменших квадратів знаходять з умови мінімуму суми квадратів відхилень Q експериментальних точок від прямої (вздовж осі y) таким чином:

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} [Y_{ij} - (a_0 + b(X_i - \bar{X}))]^2. \quad (5)$$

Оцінки коефіцієнтів ГХ з врахуванням (2), (3), (4) будуть мати такий вигляд:

$$a_0 = \bar{Y} \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m n_i \bar{Y}_i, \quad (6)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^m n_i \bar{Y}_i (X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^m n_i (X_i - \bar{X})^2} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i \bar{Y}_i X_i - N \bar{Y} \bar{X}}{\sum_{i=1}^m n_i X_i^2 - N \bar{X}^2}. \quad (7)$$

Якщо врахувати випадок спостережень рівної кратності (одинакового числа) на всіх точках діапазону ($n_i = n$), формули (6) і (7) можна подати у вигляді:

$$a_0 = \bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{Y}_i, \quad (8)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{Y}_i (X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{Y}_i X_i - m \bar{X} \bar{Y}}{\sum_{i=1}^m X_i^2 - m \bar{X}^2}. \quad (9)$$

Після побудови ГХ за даними параметрами необхідно проаналізувати як ГХ апроксимує експериментальні дані, тобто чи правильно вибраний функціональний вид залежності. Для перевірки узгодженості ГХ з експериментальними даними розглядають відхилення $\Delta_i = y_i - \hat{y}$, де y_i – результати вимірювань; \hat{y} – розрахункові значення, отримані згідно побудованої ГХ.

Якщо вид ГХ вибраний правильно, то відхилення $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m$ повинні мати випадковий характер і утворити вибірку з нульовим середнім. Якщо характер зміни закономірний (наприклад одного знаку), то потрібно шукати іншу (нелінійну) залежність.

Для лічильників (роторних та турбінних) функціональна залежність задається різними аналітичними виразами на двох піддіапазонах зміни вхідної величини: від Q_{min} до Q_t (1-ий піддіапазон, який характеризується поліномом другої степені і більше) та від Q_t до Q_{max} (2-ий піддіапазон, який характеризується залежністю близькою до лінійної), де Q_{min}, Q_t, Q_{max} – відповідно мінімальна,

перехідна та максимальна витрати. Тому для цих піддіапазонів по різному нормується похибка вимірювань. Таким чином, при МА важливо оцінити, в якій точці діапазону вимірювань ГХ переходить від одного аналітичного виразу до іншого, щоб визначити відношення $Q_{min} : Q_{max}$ для РЕ, де ГХ буде близькою до лінійної залежності.

Отже, враховуючи ці причини, при дослідженні та контролі метрологічних характеристик РЕ об'єму газу пропонується такий алгоритм:

а) сукупність багаторазових спостережень в кожній точці діапазону шкали розділюють на декілька серій, проведених в різні інтервали часу. Методом дисперсійного аналізу перевіряють належність результатів багаторазових спостережень одній генеральній сукупності;

б) на основі отриманих експериментальних даних методом найменших квадратів будують ГХ. Приклади побудови ГХ детально описані в [3]. На основі результатів вимірювань (X_i, Y), $i = 1 \dots m$ знаходять параметри ГХ і отримують її рівняння. Дані параметри ГХ є оцінками параметрів дійсної функції перетворення $f_i(x)$;

в) оцінюють похибки побудованої ГХ. Для оцінки використовуються дані про випадкові і систематичні похибки вимірювань і про характер їх змін по діапазону. Оцінюють середньоквадратичні відхилення і границі похибок для параметрів ГХ;

г) перевіряють правильність вибору апроксимаційної залежності (або оцінюють степінь відхилення дійсної залежності від вибраного виду (в даному випадку лінійної), а також узгодженість експериментальних даних з побудованою ГХ. Якщо узгодженість незадовільна, то уточнюють ГХ, тобто знаходять ту ділянку діапазону вимірювань, де ГХ має ближчий до лінійної вигляд;

д) при повірці РЕ після визначення нової ГХ і оцінки її похибки порівнюють нову ГХ з раніше прийнятою за результатами МА. Якщо зміна ГХ за міжповірочний інтервал не перевищує встановлених границь, то в подальшому використовують нову ГХ. Якщо ж зміна ГХ стала недопустимо значною, то РЕ бракується при повірці.

1. Е.Ф.Долинский. *Обработка результатов измерений*, 2-ое изд. М.: Изд-во стандартов, 1973.
2. М.А.Земельман, В.Д.Михайленко, В.Г.Цейтлин. *О нормировании метрологических характеристик индивидуального градуируемых средств измерений. // Измерительная техника. №10, - 1977. С.17-18.*
3. Л.А.Семенов, Т.Н.Сирая. *Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1986.*