

І. С. Петришин¹
 Я. В. Безгачнюк¹
 Н. І. Петришин¹
 О. А. Бас¹

ТЕСТУВАННЯ ТА ОЦІНКА ВПЛИВУ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ НА МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ВИТРАТИ ТА КІЛЬКОСТІ ГАЗУ

¹Державне підприємство «Івано-Франківськстандартметрологія»

На основі світового досвіду проаналізовано методи і способи тестування та випробування обчислювальних компонентів, що входять в склад еталонних установок відтворення одиниць об'єму та об'ємної витрати, повірочних установок для лічильників газу, коректорів та обчислювачів об'єму газу. Обумовлено необхідність оцінювання кількісних характеристик алгоритмів розрахунку об'єму газу, що піддаються тестуванню, з метою встановлення критеріїв оцінки їх впливу на метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки. Детально розписані та оцінені складові випадкової похибки від заокруглення вхідних даних, що можуть впливати на їх метрологічні характеристики. Описана процедура тестування програмного забезпечення в складі робочих еталонів (повірочних установок) та робочих засобів вимірювальної техніки (коректорів об'єму газу) для проведення державної метрологічної атестації.

Ключові слова: обчислювальний компонент, повірочні установки, об'єм та об'ємна витрата газу

Вступ

В нормативному документі [1] сформульовані вимоги до вимірювального обладнання, реалізація яких забезпечує його придатність до використання та мінімізацію ризиків отримання ним недостовірних результатів. До вимірювального обладнання поряд з вимірювальними приладами відносяться і програмні засоби (програмне забезпечення), які в сукупності із засобами обчислювальної техніки складають обчислювальний компонент вимірювальної системи, призначений для виконання обчислювальних операцій під час здійснення вимірювань. Обчислювальний компонент є об'єктом метрологічного підтвердження і має свої метрологічні характеристики.

За своєю суттю еталонні засоби вимірювання та відтворення одиниць об'єму та об'ємної витрати газу (повірочні установки), а також деякі робочі засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) з вбудованим програмним забезпеченням, що використовується в складі вимірювальних комплексів (обчислювачі та коректори), є вимірювальними системами. Їхня загальна модель показана на рис. 1.

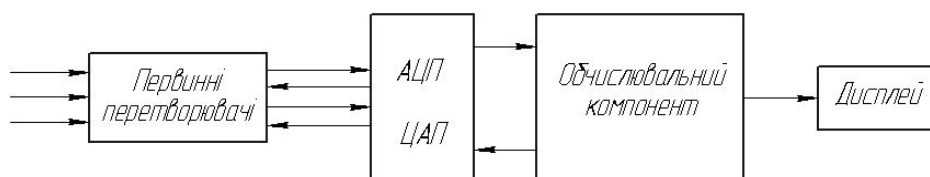


Рис. 1. Модель вимірювальної системи з обчислювальним компонентом

Згідно з нормативним документом [1] важливу роль в керуванні ризиками отримання невірогідних результатів вимірювальних систем відіграє система керування вимірюваннями (СКВ), метою якої є забезпечення придатності вимірювального обладнання до використання за призначенням. Складовими плинності метрологічних характеристик вимірювальної системи об'єму та об'ємної витрати газу, що можуть створювати ризики отримання недостовірних результатів, крім умов проведення вимірювань, характеристик вимірювального обладнання, стану навколишнього середовища, тощо, є також промахи при внесенні вхідних даних у програмне забезпечення; використання серед-

ньюстатистичних або приблизних значень окремих параметрів; відхилення результатів обчислень за методом, описаним в програмній документації, та методом, відтвореним в програмі; відхилення внесеної в програму і отриманої за результатами метрологічної атестації градувальної характеристики давачів фізичних величин, тощо [2]. Причиною похибок у цьому випадку є суб'єктивні недоліки осіб, що працюють із ЗВТ або розробляли програмне забезпечення. Усунення суб'єктивного впливового фактора на стадії розробки програмного забезпечення є складовою системи керування вимірюваннями і гарантує правильність проведення вимірювань, а, отже, їх збіжність та відтворюваність.

Програмне забезпечення у відповідності до [1] відноситься до інформаційних ресурсів СКВ і для забезпечення вірогідності результатів його потрібно тестувати та підтверджувати до початку використання.

В Україні на основі низки міжнародних документів [3, 4] розроблений «РМУ 021–2006 Порядок атестації програмного забезпечення засобів вимірювальної техніки», який застосовується під час проведення державних приймальних випробувань ЗВТ згідно з вимогами ДСТУ 3400. В цьому документі у третьому розділі «Визначення» чітко вказано, що програмне забезпечення ЗВТ не має метрологічних характеристик, але з його допомогою вони можуть визначатись та піддаватись впливу в разі його зміни. На основі встановлених в документі вимог до програмного забезпечення сформульовані критерії випробувань програмного забезпечення, етапи проведення його атестації та оформлення результатів.

Разом з тим, в документі відсутні рекомендації щодо технології проведення тестування програмного забезпечення та процедури визначення його впливу на метрологічні характеристики вимірювального обладнання, в складі якого вона функціонує.

Отже, *метою статті є* формування наукових підходів до тестування програмного забезпечення та оцінка впливу обчислювального компонента на метрологічні характеристики вимірювального обладнання, що застосовується в метрологічній практиці при обліку природного газу.

Тестування програмного забезпечення

Зупинимось детальніше на процесі тестування програмного забезпечення. Тестування (або випробування) може охоплювати перевіряння на наявність вірусів, перевіряння алгоритмів, розроблених користувачем, або, за потреби їх комбінацію для отримання необхідного результату вимірювання [5].

В [6, 7] описані методи тестування програмного забезпечення. Як правило, вони здійснюються такими способами:

за можливості задання так званих еталонних даних:

— використання у тестуванні еталонного програмного забезпечення (рис. 2а);

— генерування еталонних даних (рис. 2б);

за відсутності можливості задання еталонних даних:

— використання моделі вхідних даних (рис. 3а);

— одночасне порівняння декількох варіантів програмного забезпечення із заданням моделі вхідних даних (рис. 3б).

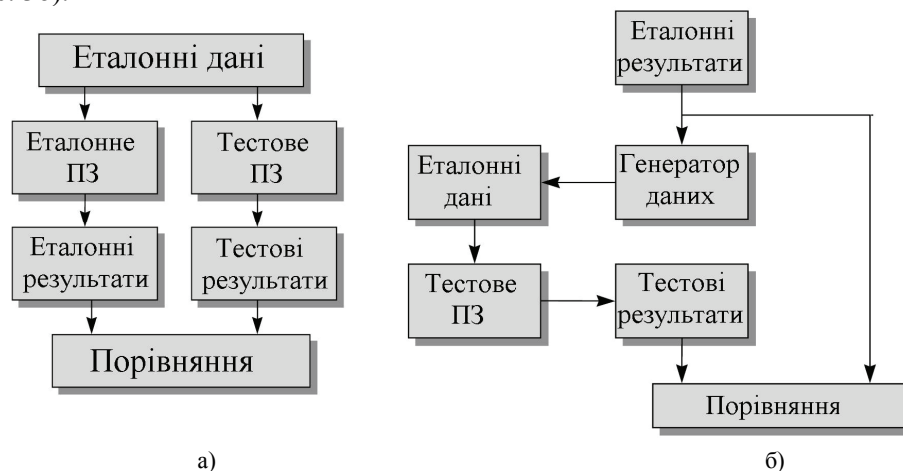


Рис. 2. Методи тестування програмного забезпечення (ПЗ) з використанням еталонних даних

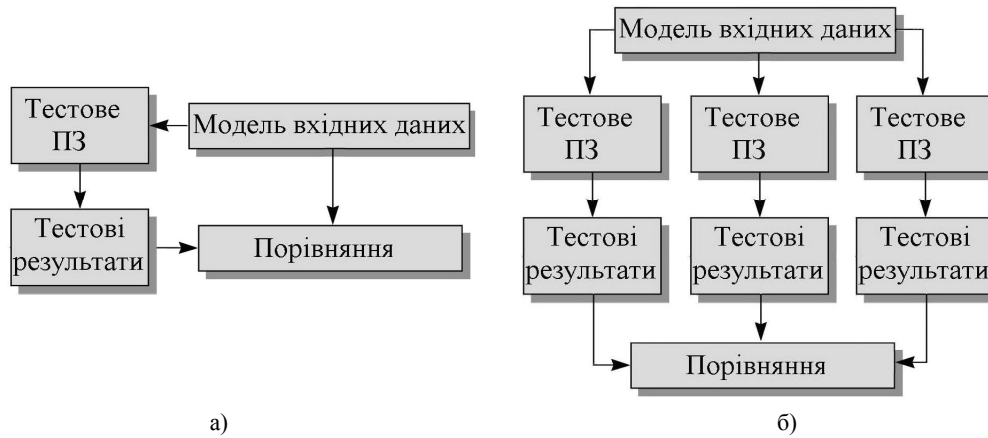


Рис. 3. Методи тестування програмного забезпечення (ПЗ) з використанням моделі вхідних даних

Для тестування програмного забезпечення використовуються еталонні вхідні і вихідні (тестові) дані, визначені завчасно, або для отримання еталонних вихідних даних використовується еталонне програмне забезпечення. Як правило, вхідні еталонні дані формуються таким чином, щоби еталонні вихідні дані залишалися незмінними — так званий метод «нуль-середовища» [7]. Цей метод може бути використаний для розв'язання широкого кола задач, що застосовуються в метрологічній практиці при обліку природного газу. Метод «нуль-середовища» дозволяє розглянути середовище наборів еталонних даних, які відносяться до вибраного розв'язку задачі вимірювання, що апіорі вважається відомим. Із цього середовища може вибиратись послідовність даних з такими властивостями, які можуть мати особливу цінність при тестуванні конкретного програмного забезпечення. У такому підході різним наборам (векторам) вхідних еталонних даних відповідає єдиний вихідний набір (вектор) еталонних даних.

Застосовуючи для тестування методи з використанням еталонних даних (рис. 2), генерування еталонних даних здійснюється за такою послідовністю:

1. За умови припущення лінійної залежності (лінійної моделі) відгуків системи, що тестується, на вхідні дані, будується модельний набір (вектор) спостережень $\vec{y}_0 = A \cdot \vec{b}$, де \vec{y}_0 — еталонні (модельні) результати, на основі яких генеруються еталонні дані; A — матриця спостережень; \vec{b} — набір (вектор) параметрів моделі, що тестуються.

2. Формується набір (вектор) імітованих випадкових помилок вимірювання \vec{r} , який генерується за допомогою випадкових чисел. Часто вектор \vec{r} необхідно видозмінювати (масштабувати) таким чином, щоби він був розподілом випадкових чисел із нормованими середнім значенням та середнім квадратичним відхилом.

3. За формулою $\vec{y} = A \cdot \vec{b} + \vec{r}$ будується набір (вектор) спостережень, що являє собою згенеровані еталонні вхідні дані для тестування.

Після проведення тестування отримані дані з тестового програмного забезпечення порівнюються з даними із еталонного програмного забезпечення.

У випадку відсутності еталонного програмного забезпечення, необхідно використовувати спеціальні технічні засоби (випробувальні стенди), які імітують «моделі вхідних даних». Схема випробувального стенда показана на рис. 4.

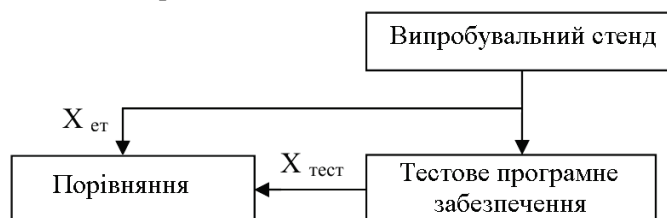


Рис. 4. Схема випробувального стенда для тестування програмного забезпечення

Як бачимо, тестування програмного забезпечення зводиться до імітації вхідних сигналів, що подаються на вхід вимірювальної системи (тобто обчислювального компонента) і викликають відповідну реакцію «вбудованого» програмного забезпечення. Нагадаємо, що під «вбудованим» розуміють про-

грамне забезпечення, розроблене для розв'язання конкретної вимірювальної задачі, а мікропроцесор, інтерфейс для під'єднання периферійних засобів та інструментальна частина ЗВТ знаходяться в одному корпусі. В таких ЗВТ безпосередній доступ до програмного забезпечення, як правило, відсутній. Прикладом такого ЗВТ є коректор об'єму газу. В подальшому результати, отримані на виході тестованого програмного забезпечення порівнюються з результатами обробки тих самих сигналів, що відтворюються еталонним програмним забезпеченням вищої якості. На основі такого порівняння робиться висновок щодо можливості використання конкретного програмного забезпечення.

Оцінювання впливу програмного забезпечення на сумарну похибку

Під час оцінювання впливу програмного забезпечення на сумарну похибку вимірювання ЗВТ, необхідно враховувати такі джерела похибок:

- похибки даних вимірювання, які є вхідними величинами програмного забезпечення, а також інших вхідних величин (калібрувальних коефіцієнтів, констант, довідкових даних, тощо);
- похибки, пов'язані з вибраним алгоритмом розв'язання задачі;
- похибки, пов'язані з реалізацією вибраного алгоритму;
- похибки, пов'язані з моделями, постулатами, які приймаються при формалізації вимірювальної задачі і складанні рівняння вимірювань.

Зазначені джерела похибок чинять спільний вплив на точність кінцевого результату вимірювань. З практичної точки зору, очевидно, що неможливо повністю розділити вплив зазначених джерел. Тому сумарну похибку впливу неможливо представити у вигляді суми чотирьох незалежних доданків, зумовлених перерахованими вище причинами. Необхідне комплексне оцінювання декількох впливних чинників.

З перелічених джерел похибок впливає, що основними, які потребують кількісної оцінки, є похибки вхідних величин і похибки, пов'язані з реалізацією вибраного алгоритму.

Для проведення кількісної оцінки розраховують характеристики точності (кількісні характеристики) алгоритмів, що піддаються тестуванню [7], зокрема, його виконавчу характеристику $P(\vec{x})$ та відносний відхил тестових результатів від еталонних δ .

Виконавча характеристика $P(\vec{x})$ показує кількість втрачених значущих цифр при обробці еталонних даних програмним забезпеченням, що тестується в порівнянні з апіорі відомим розв'язком вимірювальної задачі. Також виконавча характеристика може застосовуватись для знаходження числа втрачених цифр точності в тестових результатах в порівнянні з будь-якими іншими результатами, що використовуються для порівняння з ними (згенерованими, змодельованими, тощо).

Виконавча характеристика алгоритму визначається з формули

$$P(\vec{x}) = \lg \left(1 + \frac{1}{k(\vec{x}) \cdot \eta} \cdot \frac{\Delta \vec{y}(\vec{x})}{\vec{y}^{ET}(\vec{x})} \right), \quad (1)$$

де $k(\vec{x})$ — коефіцієнт стійкості (обумовленості), який характеризує стійкість використовуваного алгоритму по відношенню до зміни вхідних даних; η — гранично допустима точність обчислення ($\eta \approx 2 \cdot 10^{-16}$ з використанням 16-бітного процесора); (\vec{x}) — набір виконавчих параметрів, тобто: параметри вихідних даних в методі моделей вхідних даних (рис. 3); обсяг вибірки, математичне сподівання і середній квадратичний відхил в методі генерування еталонних даних (рис. 2); $\Delta \vec{y}(\vec{x})$ — довжина набору (вектора) відмінності (різниці) тестових результатів від еталонних, визначається як $\Delta \vec{y} = \sqrt{(y_1^{\text{ТЕСТ}} - y_1^{\text{ЕТ}})^2 + (y_2^{\text{ТЕСТ}} - y_2^{\text{ЕТ}})^2 + \dots + (y_m^{\text{ТЕСТ}} - y_m^{\text{ЕТ}})^2}$, де m — кількість тестових результатів; $\vec{y}^{ET}(\vec{x})$ — довжина набору (вектора) еталонних результатів, тобто $\vec{y}^{ET} = \sqrt{(y_1^{ET})^2 + (y_2^{ET})^2 + \dots + (y_m^{ET})^2}$.

Виконавча характеристика, очевидно, дорівнює нулю, якщо тестові результати дорівнюють еталонним.

Виведемо формулу для визначення коефіцієнта стійкості $k(\bar{x})$.

Згідно з вищенаведеним визначенням, коефіцієнт стійкості $k(\bar{x})$ визначається як:

$$k(\bar{x}) = \frac{\delta \bar{y}}{y} \bigg/ \frac{\delta \bar{x}}{x}.$$

Тобто

$$\delta \bar{y} = f(x + \delta x) - f(x) \approx J(x) \delta \bar{x},$$

де $J(x) = \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]$ — Якобіан функції $f(x)$.

Звідси

$$k(\bar{x}) = \frac{\|J(x) \delta \bar{x}\|}{\bar{y}} \bigg/ \frac{\delta \bar{x}}{\bar{x}} \leq \frac{\|J(x)\| \delta \bar{x}}{\bar{y}} \bigg/ \frac{\delta \bar{x}}{\bar{x}}.$$

В результаті отримуємо:

$$k(\bar{x}) = \frac{\|J(x)\| \bar{x}}{\bar{y}} = \frac{\det \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2}}{f(x_i)}. \quad (2)$$

У випадку обчислювального компонента вимірювальних систем об'єму та об'ємної витрати газу, алгоритм розрахунку якого описується такою формулою:

$$f(x_i) = V_{ji} = \frac{N_{ji}}{K_{kj}} \cdot \frac{P_{aj} + P_{ji}}{P_{aj} + P_{Eji}} \cdot \frac{T_{Eji} + 273,15}{T_{ji} + 273,15}, \quad (3)$$

де N_{ji} — кількість імпульсів з лічильника газу; K_{kj} — коефіцієнт перетворення лічильника газу, імп/м³; P_{aj} — атмосферний тиск, Па; P_{ji} — надлишковий тиск в лічильнику, Па; P_{Eji} — надлишковий тиск в еталоні, Па; T_{ji} — температура в лічильнику, °С; T_{Eji} — температура в еталоні, °С, коефіцієнт стійкості визначається як

$$k(\bar{x}) = \frac{\det \left| \frac{\partial V(N, K, P_a, P_E, P_i, T_E, T_i)}{\partial x_i} \right| \sqrt{N^2 + K^2 + P_a^2 + P_E^2 + P_i^2 + T_E^2 + T_i^2}}{V(N, K, P_a, P_E, P_i, T_E, T_i)}. \quad (4)$$

Для кожного виконавчого параметра задається область принципово можливих значень, а також набір номінальних (тих, що найчастіше зустрічаються) значень. При цьому набір виконавчих характеристик будується за таким принципом: фіксуються номінальні значення двох виконавчих параметрів (наприклад, об'єм вибірки і середній квадратичний відхил) і визначається залежність виконавчої характеристики від значень третього виконавчого параметра (наприклад, середнього значення) у всій області його можливої зміни.

Разом з тим, виконавча характеристика, що визначається формулою (1), залежить, зокрема, від величини відносного відхилення δ , який характеризує відносну зміну тестових результатів обчислень від еталонних.

$$\delta = \frac{\Delta \bar{y}(\bar{x})}{\bar{y}^{ET}(\bar{x})}. \quad (5)$$

Ця величина може розглядатись як одна з кількісних характеристик алгоритмів. Інколи її зручніше виражати в процентах.

Формули (1), (5) спрощуються, якщо результати обчислень є не вектором, а скаляром (наприклад, результати однократних вимірювань з однією впливною величиною). В такому випадку вони будуть мати вигляд

$$P(x) = \lg \left(1 + \frac{(\Delta y(x) - y^{ET}(x))}{k(x) \cdot \eta \cdot y^{ET}(x)} \right); \quad (6)$$

$$\delta = \frac{\Delta y(y) - y^{ET}(x)}{y^{ET}(x)}. \quad (7)$$

Критерії, яким мають задовольняти оцінені характеристики алгоритмів програмного забезпечення, а також допустимі значення вказаних характеристик можуть бути встановлені на основі вимог до точності рішення вимірювальної задачі (якщо вони наявні), точності виконуваних розрахунків (ступені округлення), тощо.

Для кількісної оцінки впливу програмного забезпечення та його вкладу в сумарну похибку необхідно з отриманої вибірки відхилень δ_i (5) або (7), вибрати максимальне значення, виражене у відсотках. Необхідно уточнити, що це значення є «сумарною» оцінкою всіх впливних похибки програмного забезпечення, оскільки, як уже зазначалось, неможливо, наприклад, виділити складову похибки, зумовлену формуванням еталонних даних.

Основним змістом процедури атестації програмного забезпечення є атестація алгоритму обробки даних, які реалізуються цим програмним забезпеченням. Програмне забезпечення не повинно вносити значних похибок в сумарну похибку результату вимірювання.

Слід зазначити, що в нормативних документах [8, 9] поняття метрологічних характеристик також відноситься до обчислювальних компонентів. А у [10, 11] встановлено номенклатуру та комплексні метрологічні характеристики обчислювального компонента, наведено модель похибки обчислювального компонента Δ_{OK} , яка в залежності від типу обчислювальних процедур представлена у вигляді такої функціональної залежності:

$$\Delta_{OK} = \Delta_S * \Delta_3 * \psi_{\Delta}(\xi) * \Delta_d, \quad (8)$$

де Δ_S — систематична похибка обчислювального компонента; Δ_3 — випадкова похибка обчислювального компонента; $\psi_{\Delta}(\xi)$ — функція впливу на похибку обчислювального компонента; Δ_d — динамічна похибка обчислювального компонента.

Оскільки в алгоритм роботи обчислювального компонента вимірювальних систем об'єму та об'ємної витрати газу (а це в тому числі і повірочні установки) закладено рівняння вимірювань (3) то, згідно з табл. 1 [10] в обчисленнях за формулами або у так званих простих обчисленнях вид моделі похибок обчислювального компонента Δ_{OK} визначається тільки випадковою похибкою округлення:

$$\Delta_{OK} = \Delta_3. \quad (9)$$

Ця похибка зумовлена округленням проміжних результатів обчислень та подальшого накопичення похибок заокруглення. Разом з тим, складовою цієї похибки є заокруглення, які виникають при переведенні даних з десяткової системи числення до двійкової і навпаки. В цьому випадку відсутня систематична складова похибки, яка виникає внаслідок використання обчислювальних алгоритмів, що реалізують наближені методи, в яких результат обчислень залежить від параметрів наближення, а саме числа ітерацій, кроку інтегрування, тощо, функції впливу $\psi_{\Delta}(\xi)$, тобто чутливості обчислювального компонента до впливних величин та динамічна похибка Δ_d , що описує властивість обчислювального компонента підсилювати похибку вхідних даних.

Державна метрологічна атестація повірочних установок для лічильників газу одним із пунктів програми атестації має перевірку програмного забезпечення. Перевірка програмного забезпечення полягає у перевірці алгоритму функціонування та алгоритму обчислень, а також визначення можливих похибок, зумовлених дискретністю та округленням вхідних вимірюваних даних [12].

Перевірка здійснюється способом використання еталонного програмного забезпечення (рис. 2а), а саме шляхом імітації вхідних вимірюваних величин, таких як тиск, температура вимірюваного середовища та кількість імпульсів з досліджуваного лічильника, що відповідає вимірюваному об'єму газу. В якості джерела опорного значення кількості імпульсів використовується ета-

лон передавання, що монтується в дослідній секції повірочної установки.

Температура вимірюваного середовища моделюється за допомогою термостата, в який занурюються первинні вимірювальні перетворювачі, що вимірюють температуру на еталонному лічильнику та на дослідній ділянці. Калібратором тиску задаються відповідні значення тисків на еталонній та на дослідній секціях.

Далі проводять вимірювання з використанням програмного забезпечення повірочної установки і паралельно проводять розрахунки за відповідним рівнянням вимірювання з використанням спеціально розробленого еталонного програмного забезпечення. За отриманими результатами оцінюють відхилення результатів розрахунків та розраховують виконавчу характеристику згідно з (1) з урахуванням (4).

Якщо отримані відхилення для різних значень вхідних параметрів не перевищують 0,01 %, а виконавча характеристика близька до нуля, то програмне забезпечення вважається таким, що пройшло перевірку, в іншому випадку розробник повинен здійснити перевірку реалізованого в програмному забезпеченні алгоритму розрахунків.

З урахуванням такого підходу у всіх нормативних документах на методи метрологічної атестації та повірки ЗВТ об'єму та об'ємної витрати газу встановлені вимоги до заокруглення результатів вимірювання окремих фізичних величин (кількість знаків після коми) з метою гарантування та збереження ієрархії передачі даних одиниць до робочих ЗВТ.

Для робочих еталонів — установок для повірки лічильників газу, значення вимірюваних тисків, представляється, як правило, з роздільною здатністю $\Delta P_i = 1$ Па, тобто складова похибки δ_{P_i} зумовлена роздільною здатністю каналу вимірювання тиску визначається як

$$\delta_{P_i} = \frac{\Delta P_i}{P_i} 100. \quad (10)$$

Для абсолютного тиску P_i в діапазоні від 84 до 106,7 кПа, який закладено в умови проведення повірки, ця складова похибки становить $\approx 0,001$ %.

Значення температур представляється програмним забезпеченням повірочної установки з роздільною здатністю $\Delta T_i = 0,01$ °С, що зумовлює похибку δ_{T_i} в діапазоні температур $T_i = (20 \pm 2)$ °С:

$$\delta_{T_i} = \frac{\Delta T_i}{T_i + 273,15} \cdot 100 \approx 0,003 \%. \quad (11)$$

Складова похибки δ_{N_i} каналу лічби імпульсів з еталонних лічильників передбачена програмою та методикою державної метрологічної атестації і у випадку, якщо в установці не реалізовано метод імпульсної інтерполяції, обчислюється за формулою

$$\delta_{N_i} = \frac{2}{N_{\min}} \cdot 100, \quad (12)$$

де N_{\min} — кількість імпульсів, що відповідає контрольному обсягу.

Тому складова похибки δ_{N_i} , зумовлена округленням, не перевищуватиме $\approx 0,005$ %, оскільки коефіцієнт перетворення еталонного лічильника K_i , згідно з програмою та методикою державної метрологічної атестації представляється шістьма значущими цифрами.

З урахуванням критерію мізерно малої похибки, якщо складова сумарної похибки складає 1/3 від сумарної, то величиною цієї складової можна знехтувати. Для повірочних установок з сумарною похибкою $\delta = 0,3$ %, значеннями вищезазначених складових похибки можна знехтувати.

Коректор об'єму газу зводить об'єм газу, вимірюваний за робочих умов, до стандартних умов. Приведення здійснюється за формулою

$$V_0 = \frac{N}{K_{PER}} \cdot \frac{P}{0,101325} \cdot \frac{293,15}{t + 273,15} \cdot \frac{1}{K_{CT}}, \quad (13)$$

де V_0 — розрахункове значення об'єму газу, м³; N — кількість імпульсів з лічильника газу, імпульс; K_{PER} — коефіцієнт перетворення лічильника газу, імпульс/м³; P — абсолютний тиск, МПа; t — температура газу, °С; K_{CT} — коефіцієнт стисливості газу.

Коефіцієнт стисливості K_{CT} розраховується одним із відомих методів: NX-19мод., GERG-91,

тощо [13, 14].

У відповідності з рекомендаціями [15] похибка розрахунку коефіцієнта стисливості δ_{vd} , яка з'являється у зв'язку з похибкою вимірювання вхідних даних, визначають за формулою

$$\delta_{vd} = \frac{1}{K_{CT}} \sqrt{\sum_{k=1}^{N_q} \left[\left(\frac{\partial K_{CT}}{\partial \bar{q}_k} \right)_{\bar{q}_{l,l \neq k}} \bar{q}_k \cdot \delta_{qk} \right]^2}, \quad (14)$$

де δ_{qk} — похибка вимірювання параметра вхідних даних; \bar{q}_k — середнє значення k -го параметра в деякий проміжок часу (доба, місяць, рік і т. д.); N_q — кількість параметрів вихідних даних.

Загальна похибка розрахунку коефіцієнта стисливості визначається так:

$$\delta_{KCT} = \sqrt{\delta^2 + \delta_{vd}^2}, \quad (15)$$

де δ — похибка розрахунку коефіцієнту стисливості, яка для кожного методу визначається згідно з [16].

Вихідними даними для обчислення є результати вимірювання об'єму газу за робочих умов і тиску та температури газу, а також дані про густину газу за стандартних умов, вміст азоту і двоокису вуглецю, які заносяться вручну в пам'ять коректора.

Для методів NX–19 мод. і GERG–91 допускається розраховувати похибку δ_{vd} за формулою

$$\delta_{vd} = \frac{1}{K_{CT}} \sqrt{(K_t t \delta_t)^2 + (K_p p \delta_p)^2 + (K_{pc} \rho_c \delta_{pc})^2 + (K_{xa} x_a \delta_{xa})^2 + (K_{xy} x_y \delta_{xy})^2}, \quad (16)$$

де δ_t , δ_p , δ_{pc} , δ_{xa} і δ_{xy} — похибки вимірюваних параметрів, відповідно, температури, тиску та густини природного газу за стандартних умов, вміст азоту і двоокису вуглецю в ньому.

Проаналізуємо похибки зумовлені округленням даних, що заносяться в коректор вручну.

У відповідності до нормативних документів на коректори [17], густина газу за стандартних умов заноситься в пам'ять коректора з п'ятьма значущими розрядами, отже, при округленні може змінюватись останній розряд, тоді абсолютна похибка округлення густини за стандартних умов складає не більше 0,0001 кг/м³.

Молярні частки азоту та двоокису вуглецю заносяться з чотирма значущими розрядами, тобто похибка округлення складає 0,0001 %.

Обчислимо внесок кожної складової в сумарну похибку коректора.

Для прикладу, враховуючи вагові коефіцієнти кожної аналізованої складової згідно з [16], значення складових похибок від округлення вхідних даних згідно з формулою (16) дорівнюють, відповідно:

— для густини газу за стандартних умов

$$\delta(\rho_c)_{vd} = \frac{1}{K_{pc}} \sqrt{(K_{pc} \rho_c \delta_{pc})^2} = 0,007 \% ; \quad (17)$$

— для молярної долі азоту

$$\delta(N_2)_{vd} = \frac{1}{K_{xa}} \sqrt{(K_{xa} x_a \delta_{xa})^2} = 0,0004 \% ; \quad (18)$$

— для молярної долі двоокису вуглецю

$$\delta(\text{CO}_2)_{vd} = \frac{1}{K_{xy}} \sqrt{(K_{xy} x_y \delta_{xy})^2} = 0,00003 \% . \quad (19)$$

Отже, похибками від округлення вхідних даних, що заносяться в пам'ять коректора вручну можна знехтувати.

Обчислення коефіцієнта стисливості і, відповідно, коефіцієнта зведення до стандартних умов коректором (обчислювачем) здійснюється одним із методів, згідно з [16], ітераційним способом. Ітераційне обчислення може призводити до появи додаткової похибки у випадку зміни числа ітераційних циклів під час обчислення. Але слід відмітити, що ця складова похибки входить в похибку розрахунку коефіцієнта стисливості (15). Під час метрологічної атестації чи перевірки коректора

(обчислювача) моделюються різні умови та різний набір вхідних даних, із застосуванням моделі вхідних даних (рис. 3а) і оцінюються похибки обчислення коефіцієнта стисливості та приведення, тобто окремо складова похибка зумовлена ітераційним процесом обчислення не виділяється, але вона враховується в границях основної похибки коректора (обчислювача). Тому в методичних документах цю складову окремо не виділяють.

Таким чином, на основі вищенаведених розрахунків можна констатувати факт, що випадкова похибка від округлення проміжних результатів обчислювальних компонентів обчислювачів та коректорів об'єму газу за дотримання встановлених вимог нормативної документації на них, складає мізерно малу величину їх загальної сумарної похибки, якою під час проведення процедур метрологічного контролю нехтують.

Висновок

На основі проведеного аналізу існуючих методів тестування запропоновано процедуру проведення тестування програмного забезпечення з метою оцінки можливості його подальшого використання в складі обчислювального компонента. Обрано оптимальний метод тестування, для якого описана процедура застосування для атестації обладнання, що застосовується в метрологічній практиці обліку природного газу. Оцінено вплив випадкової складової обчислювального компонента, зумовленої округленням вимірних значень фізичних величин, на сумарну похибку цих засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT): ДСТУ ISO 10012:2005. — [Чинний від 2007-01-01]. — К. : Держспоживстандарт, 2005. — 26 с.
2. Measurement system analysis (MSA). Reference Manual / Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation Third Edition. — Automotive Industry Action Group, Southfield, Michigan — March. 2002 — 239 p.
3. Оценка качества программных средств. Общие положения: ГОСТ 28195-89. — [Действующий от 1990.07.01]. — М. : Издательство стандартов, 1990 — 40 с.
4. Рекомендация КООМЕТ. Программное обеспечение средств измерений. Общие технические требования / COOMET R/LM/10:2004. Утверждена на 14 заседании Комитета КООМЕТ (Албена, Болгария, 27—28 мая 2004 г.) — 10 с.
5. General requirements for software controlled measuring instruments: International Documents (OIML D) 31 Edition 2008 (E) — Paris, Bureau International de Métrologie Légale, 2008 — 53p.
6. Issue 1. Software Guide (Measuring Instruments Directive 2004/22/EC): WELMEC 7.2. — Delft, WELMEC Secretariat, 2005. — 120 p.
7. H. R. Cook Testing Spreadsheets and Other Packages Used in Metrology. A Case Study. Report to National Measurements System Policy Unit / H. R. Cook, M. G. Cox, M. P. Dainton, P. M. Harris // National Physical Laboratory, Queens Road, Teddington, September 1999.
8. Метрологія. Системи вимірювальні інформаційні. Метрологічне забезпечення. Основні положення: Р 50–080–99 [Чинний від 2000.07.01]. — К. : Держспоживстандарт України, 2000. — 23 с.
9. Метрологія. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Метрологічне забезпечення. Основні положення: ДСТУ 2709–94. — [Чинний від 1995.07.01]. — К. : Держстандарт України, 1994. — 38 с.
10. Метрологія. Вимірювальні інформаційні системи та автоматизовані системи керування технологічними процесами. Типова програма та методика метрологічної атестації обчислювальних компонентів: РМУ 012–2003. — Львів : ДНДІ «Система», 2003. — 18 с.
11. Кричевець О. Метрологічне забезпечення обчислювальних компонентів вимірювальних інформаційних систем / О. Кричевець // Метрологія та прилади. — 2012. — № 2. — С. 37–42.
12. Петришин І. С. До питання «метрологічних моделей» та «метрологічних характеристик» програмного забезпечення / І. С. Петришин // Український метрологічний журнал. — 2013. — № 2. — С. 34–38.
13. Natural gas — calculation of compression factor. Part 2 : Calculation using a molar composition analysis: ISO/TC 193 SC1 № 62. — Geneva, 1990. — 39 p.
14. Jaeschke M. The GERG Databank of High Accuracy Compressibility Factor Measurements. GERG TM4 1990 / Jaeschke M., Humphreys A. E. — GERG Technical Monograph, 1990. — 477 p.
15. International Standard. Measurement of fluid flow — Estimation of uncertainty of a flow-rate measurement: ISO 5168:1978. — Geneva, 1978. — 71 p.
16. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2-96. — [Действующий от 1997.07.01] — Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. — 37с.
17. Коректори до лічильників газу електронні. Загальні технічні умови: ДСТУ EN 12405:2006 [Чинний від 2007.01.01]. — К. : Держспоживстандарт України, 2007. — 44 с.

Рекомендована кафедрою теоретичної електротехніки та електротехнічних вимірювань

Стаття надійшла до редакції 6.03.2014

Петришин Ігор Степанович — д-р. техн. наук, професор, головний науковий співробітник;
Безгачнюк Ярослав Володимирович — канд. техн. наук, начальник лабораторії;
Петришин Наталія Ігорівна — канд. техн. наук, начальник відділу;
Бас Олександр Анатолійович — науковий співробітник, e-mail: alexandr.sanya@gmail.com.
Державне підприємство «Івано-Франківськстандартметрологія», Івано-Франківськ

I. S. Petryshyn¹
Ya. V. Bezgachniuk¹
N. I. Petryshyn¹
O. A. Bas¹

Testing and estimation of calculation components influence on metrological properties of gas flow metering devices

¹ State Enterprise «Ivano-Frankivskstandartmetrolohiia»

Based on international experience the paper analyzed the methods and means testing and trial of computer components included in the composition standard prover gas volume and flow rate reproduction, gas meters calibration prover, gas volume correctors. The necessity to assess the quantitative characteristics of algorithms gas calculation that are tested to establish criteria for assessing their impact on the metrological characteristics of measuring instruments is substantiated in the paper. Details and components of the random error of rounding input that may affect their metrological characteristics are estimated. The procedure of the software testing within the working standards (gas meters calibration prover) and working measuring equipment (gas volume correctors) during the state metrological attestation is described in the paper.

Keywords: calculating components, calibration prover, gas volume and flow rate.

Petryshyn Igor S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Chief Researcher of Laboratory;
Bezgachniuk Yaroslav V. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Laboratory;
Petryshyn Natalia I. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department;
Bas Oleksandr A. — Research Assistant, e-mail: alexandr.sanya@gmail.com

И. С. Петрышин¹
Я. В. Безгачнюк¹
Н. И. Петрышин¹
А. А. Бас¹

Тестирование и оценка влияния вычислительных компонентов на метрологические характеристики средств измерений расхода и количества газа

¹ Государственное предприятие «Ивано-Франковскстандартметрология»

На основе мирового опыта проанализированы методы и способы тестирования и испытания вычислительных компонентов, входящих в состав эталонных установок воспроизведения единиц объема и объемного расхода, поверочных установок для поверки счетчиков газа, корректоров и вычислителей объема газа. Обусловлена необходимость оценивания количественных характеристик алгоритмов расчета объема газа, которые подвергаются тестированию, с целью установления критериев оценки их влияния на метрологические характеристики средств измерений. Детально расписаны и оценены составляющие случайной погрешности от округления входных данных, которые могут влиять на их метрологические характеристики. Описана процедура тестирования программного обеспечения в составе рабочих эталонов (поверочных установок) и рабочих средств измерений (корректоров объема газа) при проведении государственной метрологической аттестации.

Ключевые слова: вычислительный компонент, поверочные установки, объем и объемный расход газа.

Петрышин Игорь Степанович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник;
Безгачнюк Ярослав Владимирович — канд. техн. наук, начальник лаборатории;
Петрышин Наталья Игоревна — канд. техн. наук, начальник отдела;
Бас Александр Анатольевич — научный сотрудник, alexandr.sanya@gmail.com