



УДК 006.91:681.122

ДО ПИТАННЯ “МЕТРОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ” ТА “МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК” ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

(Для обговорення)

І.С. Петришин, доктор технічних наук, професор, генеральний директор ДП “Івано-Франківськстандарт-метрологія”



Проаналізовано публікації щодо “метрологічних характеристик” програмного забезпечення. Обґрунтовано недоцільність використання таких термінів та підходів щодо програмного забезпечення. Детально описано складові похибки від обчислюваних компонентів та показано, що вони не впливають на сумарну похибку повірочних установок для лічильників газу та коректорів об'єму газу.

The publication on “metrological characteristics” of software is analyzed. The inexpediency of such terms and approaches to software usage was grounded. The components of error of the calculated components were described in details and it was shown that they did not affect on the overall error gas meters provers and gas volume correctors.

The publication on “metrological characteristics” of software is analyzed. The inexpediency of such terms and approaches to software usage was grounded. The components of error of the calculated components were described in details and it was shown that they did not affect on the overall error gas meters provers and gas volume correctors.

На сторінках журналу “Методи та прилади контролю якості” № 29 за 2012 р. опубліковано статтю М.В. Кузя “Оцінка складових похибки обчислювальних компонентів засобів вимірювань об'єму газу на основі якісних показників програмного забезпечення”. Аналогічні за темою та змістом статті цього ж автора опубліковано в інших фахових виданнях: науково-технічному виданні “Український метрологічний журнал” № 3 за 2012 р. – стаття “Метрологічна модель програмного забезпечення еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу”; “Віснику Національного технічного університету ХПІ” (сер. “Автоматика та приладобудування”), вип. № 37 за 2012 р. – стаття “Методологія визначення метрологічних характеристик програмного забезпечення еталонів одиниць об'єму газу” (у співавторстві з проф. О.Є. Середюком); науково-виробничому журналі “Нафтова і газова промисловість” № 1 за 2012 р. – стаття “Метрологічне ранжування якісних показників програмного забезпечення повірочних установок лічильників газу”. Темою цих публікацій є суб'єктивний підхід авторів до ідеї

“визначення похибок програмного забезпечення”, яке є функціональною частиною засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та постачається з комплектом програмних документів. Таким чином, на думку авторів, програмне забезпечення стає автономним об'єктом метрологічного забезпечення, а технічні та експлуатаційні характеристики обчислювального середовища, в якому, власне, функціонують програмні засоби, до уваги не беруться. Авторами на базі якісних показників програмного забезпечення: надійності, супроводжуваності, зручності використання, ефективності, універсальності, функціональності тощо – формується “номенклатура метрологічних характеристик” та “бюджет похибок програмного забезпечення”. У першу чергу, автори роблять акцент на еталонних засобах вимірювань об'єму та об'ємної витрати газу, а також робочих засобах (обчислювачах та коректорах об'єму газу), але зрозуміло, що такий підхід може торкнутися інших ЗВТ, до складу яких входить обчислювальний компонент. Через те що у висновках наведених вище публікацій автори нав'язують ідею необхідності перегляду нормативної основи метрологічного забезпечення вимірювань об'єму та об'ємної витрати, а саме, методик перевірки та метрологічної атестації ЗВТ, автор даної статті, як співавтор та розробник багатьох із цих документів, хоче через сторінки журналу висловити свою думку з цього питання.

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

В Україні на основі ряду міжнародних документів [1–3] розроблено РМУ 021-2006 “Порядок атестації програмного забезпечення засобів вимірювальної техніки”, що застосовуються при проведенні державних приймальних випробувань ЗВТ згідно з вимогами ДСТУ 3400:2006. У цьому документі у 3-му розділі “Визначення” чітко вказано, що програмне забезпечення ЗВТ не має метрологічних характеристик, але за його допомогою вони можуть визначатися та піддаватися впливу в разі

його зміни. На основі встановлених у документі вимог до програмного забезпечення сформульовано критерії випробувань програмного забезпечення, етапи проведення його атестації та оформлення результатів. За результатами атестації програмного забезпечення ЗВТ дається рекомендація про можливість застосування атестованого програмного забезпечення у складі конкретного ЗВТ, що подається на державні приймальні випробування.

Ні про які “метрологічні характеристики” програмного забезпечення ЗВТ у РМУ 021-2006 мова не йдеться.

Існують інші нормативні документи [4, 5], в яких поняття метрологічних характеристик належить до обчислювальних компонентів, тобто сукупності програм (комплексів програм) на носіях даних та обчислювальних засобів, що входять до складу вимірювальних систем, які призначені для виконання обчислювальних операцій під час вимірювань. В [6, 7] встановлено номенклатуру та комплексні метрологічні характеристики обчислювального компонента, наведено модель похибки обчислювального компонента Δ_{OK} , яка в залежності від типу обчислювальних процедур має вигляд

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

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.

Через те що 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

$$V_{ji} = \frac{N_{ji}}{K_{kj}} \cdot \frac{P_{aj} + P_{ji}}{P_{aj} + P_{Eji}} \cdot \frac{T_{Eji} + 273,15}{T_{ji} + 273,15},$$

де V_{ji} – контрольний об’єм, відтворений еталоном, м³; N_{ji} – кількість імпульсів з лічильника газу; K_{kj} – коефіцієнт перетворення лічильника газу, імп./м³; P_{aj} – атмосферний тиск, Па; P_{ji} – надлишковий тиск у лічильнику, Па; P_{Eji} – надлишковий тиск в еталоні, Па; T_{ji} – температура в лічильнику, °С; T_{Eji} – температура в еталоні, °С, то, згідно з табл. 1 [6], при обчисленнях за формулами або так званих простих обчисленнях вид моделі похибок обчислювального компонента Δ_{OK} визначається тільки випадковою похибкою округлення:

$$\Delta_{OK} = \Delta_3.$$

Цю похибку зумовлено округленням проміжних результатів обчислень та подальшим накопиченням похибок заокруглення. У цьому випадку відсутні 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 інтегру-

вання тощо, функції впливу $\psi_{\Delta}(\xi)$, тобто чутливості обчислювального компонента до впливових величин, та динамічна похибка Δ_d , що описує властивість обчислювального компонента підсилювати похибку вхідних даних.

При державній метрологічній атестації повірочних установок для лічильників газу одним із пунктів програми атестації є перевірка програмного забезпечення, яка полягає у перевірці алгоритму функціонування та алгоритму обчислень, а також визначенні можливих похибок, зумовлених дискретністю та округленням вхідних вимірюваних даних.

Перевірка здійснюється шляхом імітації вхідних вимірюваних величин, таких, як тиск, температура вимірюваного середовища та кількість імпульсів із досліджуваного лічильника, що відповідає вимірюваному об’єму газу. Як джерело опорного значення кількості імпульсів використовується еталон 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 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. Якщо отримані відхилення для різних значень вхідних параметрів не перевищують 0,01 %, 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 в усіх нормативних документах на методи метрологічної атестації та повірки ЗВТ об’єму та об’ємної витрати газу встановлено 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 подається, як правило, з роздільною здатністю $\Delta P_i = 1$ Па, тобто складова похибки δ_P , зумовлена роздільною здатністю каналу вимірювання тиску, визначається як

$$\delta_P = \frac{\Delta P_i}{P_i} \cdot 100.$$

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

Значення температур подається програмним забезпеченням повірочної установки з роздільною здатністю $\Delta T_i = 0,01$ °C, що зумовлює похибку δ_T в діапазоні температур $T_i = (20 \pm 2)$ °C:

$$\delta_T = \frac{\Delta T_i}{T_i + 273,15} \approx 0,003 \%$$

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

$$\delta_{N_i} = \frac{2}{N_{\min}} \cdot 100,$$

де N_{\min} – кількість імпульсів, що відповідає контрольному об'єму.

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

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

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

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

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

Коефіцієнт стисливості K_{CT} розраховується одним із відомих методів: NX-19мод., GERG-91 тощо [8, 9].

У відповідності до рекомендацій [10], похибку розрахунку коефіцієнта стисливості δ_{vd} , яка виникає у зв'язку з похибкою вимірювання вхідних даних, визначають за формулою

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

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 вхідних даних.

Загальна похибка розрахунку коефіцієнта стисливості визначається як

$$\delta_{K_{\text{CT}}} = \sqrt{\delta^2 + \delta_{\text{vd}}^2}, \quad (1)$$

де δ – похибка розрахунку коефіцієнта стисливості, яка для кожного методу визначається згідно з табл. 1 [11].

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-19мод. і GERG-91 допускається розраховувати похибку δ_{vd} за формулою

$$\delta_{\text{vd}} = \frac{1}{K_{\text{CT}}} \left((K_t t \delta_t)^2 + (K_p t \delta_p)^2 + (K_{\rho_c} \rho_c \delta_{\rho_c})^2 + (K_{x_a} x_a \delta_{x_a})^2 + (K_{x_y} x_y \delta_{x_y})^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

де δ_t , δ_p , δ_{ρ_c} , δ_{x_a} і δ_{x_y} – похибки вимірюваних параметрів температури, тиску та густини природного газу при стандартних умовах, вміст азоту і двоокису вуглецю в ньому відповідно.

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

Густина газу за стандартних умов заноситься в пам'ять коректора з п'ятьма значущими розрядами, отже, при округленні може змінюватися останній розряд, тоді абсолютна похибка округлення густини за стандартних умов становить не більше 0,0001 кг/м³.

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

Обчислимо внесок кожної складової в сумарну похибку коректора.

Наприклад, з урахуванням вагових коефіцієнтів кожної аналізованої складової згідно з [11] значення складових похибок від округлення вхідних даних, згідно з формулою (2), відповідно дорівнюють:

для густини газу за стандартних умов –

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

для молярної долі азоту –

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

для молярної долі двоокису вуглецю –

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

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

Обчислення коефіцієнта стисливості і відповідно коефіцієнта приведення до стандартних умов коректором (обчислювачем) здійснюється одним із методів, згідно з [11], ітераційним способом. Ітераційне обчислення може призводити до появи додаткової похибки у випадку зміни числа ітераційних

циклів під час обчислення. Але слід відзначити, що ця складова похибки входить в похибку розрахунку коефіцієнта стисливості (1). Під час метрологічної атестації чи перевірки коректора (обчислювача) моделюються різні умови та різний набір вхідних даних і оцінюються похибки обчислення коефіцієнта стисливості та приведення, тобто окремо складова похибки, 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 наведених вище розрахунків можна констатувати той факт, що випадкова похибка від округлення проміжних результатів обчислювальних компонентів еталонних засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу, а також робочих засобів (обчислювачів та коректорів об'єму газу) при дотриманні встановлених вимог нормативної документації на них становить нехтовно малу величину їхньої загальної сумарної похибки, якою при проведенні процедур метрологічного контролю нехтують.

Автори ідеї "визначення похибок програмного забезпечення" в "наукоподібному" вигляді формулюють "бюджет похибок програмного забезпечення", складовими якого, наприклад, є: промахи при внесенні вхідних даних у програмне забезпечення; використання середньостатистичних або приблизних значень окремих параметрів (таких, як барометричний тиск); відхилення результатів обчислень за методом, описаним у програмній документації, та методом, відтвореним у програмі; відхилення внесеної в програму і отриманої за результатами метрологічної атестації градуовальної характеристики давачів фізичних величин тощо. Тобто, загалом, програмному забезпеченню приписуються так звані "похибки операторів" – суб'єктивні промахи 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.

Звичайно, метрологічні характеристики властиві технічним засобам, які вимірюють чи обробляють інформацію з фізичними величинами, і для них вони повинні нормуватися. Таким чином, об'єктом метрологічного забезпечення є обчислювальний компонент, що входить до складу ЗВТ. Програмне забезпечення є прикладним математичним апаратом обчислювального компонента, і згідно з [1, 2] сформульовано номенклатуру якісних показників стосовно його призначення та сфери застосування. Але ці показники не є фізичними величинами, їм не приписані ніякі одиниці вимірювання і вони не можуть мати нормованих метрологічних характеристик. Якісна оцінка цих показників на основі

приписаних їм числових значень, з точки зору кваліметрії, не є тотожною з метрологічними поняттями виміряних значень, навіть якщо з цими числовими значеннями можна оперувати методами математичної статистики, тобто визначити їхнє абсолютне чи відносне відхилення або СКВ. Цілком безпідставно приписувати, наприклад, такому показнику якості програмного забезпечення, як "зручність використання" метрологічну характеристику "достатність отриманої інформації для продовження роботи" і характеризувати її відносним відхиленням. Тому приписувати програмному забезпеченню "метрологічні моделі" або "метрологічні характеристики" з відривом його від обчислювальних пристроїв є псевдонауковим підходом, який може ввести в оману працівників метрологічних служб та організацій при проведенні досліджень метрологічних характеристик ЗВТ з обчислювальним компонентом з метою встановлення придатності їх до застосування та розробленні нормативних документів на повірочні схеми, методи перевірки, калібрування та метрологічної атестації ЗВТ, у складі яких є обчислювальний компонент.

Список літератури

1. Оценка качества программных средств. Общие положения: ГОСТ 28195-89. – [Дата введения 1990-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 31 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
2. Рекомендация КООМЕТ. Программное обеспечение средств измерений. Общие технические требования: СОМЕТ R/LM/10:2004. – Утвержд. на 14 засед. Комитета СОМЕТ. – Албена, Болгария, 27–28 мая 2004.
3. General requirements for software controlled measuring instruments: OIML D 31. – Edition 2008 (E).
4. Метрологія. Системи вимірювальні інформаційні. Метрологічне забезпечення. Основні положення: Р 50–080–99. – Київ: Держспоживстандарт України, 2000. – 23 с.
5. Метрологія. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Метрологічне забезпечення. Основні положення: ДСТУ 2709-94. – [Чинний від 1995-07-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 38 с. – (Державний стандарт України).
6. 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.
7. Кричевець О. Метрологічне забезпечення обчислювальних компонентів вимірювальних інформаційних систем / О. Кричевець // Метрологія та прилади. – 2012. – № 2. – С. 37–42.

8. Natural gas – calculation of compression factor. Part 2: Calculation using a molar composition analysis: ISO/TC 193 SC1 № 62. – Geneva. – 39 p.
9. *Jaeschke M.* The GERG databank of high accuracy compressibility factor measurements / M. Jaeschke, A.E. Humphreys // GERG TM4 1990: GERG technical monograph, 1990. – 477 p.
10. International standard. Measurement of fluid flow – estimation of uncertainty of a flow-rate measurement: ISO 5168:1978. – Geneva, 1978. – 71 p. – (Міжнародний стандарт).
11. Газ природний. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2-96. – [Дата введения 2000-01-01]. – Минск: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 37 с. – (Межгосударственный стандарт).