

**УДК 004:681.121**

*М.В. КУЗЬ*, канд. техн. наук, доцент кафедри Івано-Франківського університету права імені Короля Данила Галицького

*О.Є. СЕРЕДЮК*, д-р. техн. наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## **МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕТАЛОНІВ ОДИНИЦІ ОБ'ЄМУ ГАЗУ**

Проанализированы источники возникновения погрешности программного обеспечения измерительных систем. Оценено влияние несоответствий в работе программного обеспечения на погрешность программы. Разработана методика определения метрологических характеристик программного обеспечения вычислительного компонента эталонов единиц объема газа.

Analyzed the source of the error of measuring software systems. Influence of inconsistencies in the software program error. A technique to determine the metrological characteristics of computer software component standards unit volume of gas.

**Постановка проблеми.** До складу всіх еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу входить інформаційно-вимірювальна система збору та обробки інформації про виміряні параметри робочого середовища. Обчислювальний компонент системи організований на базі персонального комп'ютера, оснащеного необхідним програмним забезпеченням, яке розробляють виробники еталонів.

Чинні методичні документи встановлюють методи визначення та контролю метрологічних характеристик дзвонівимірювальних установок, еталонних лічильників газу, критичних сопел, PVT ємностей і не містять методик визначення похибок програмного забезпечення еталонів, хоча вказують на необхідність оцінки цих похибок.

**Аналіз літератури.** В методичних документах [1,2] вказано, що перевірку програмного забезпечення проводять згідно експлуатаційної документації на повірочну установку, або за додатковою програмою шляхом імітації повірки лічильника (-ів) газу. Результати перевірки програмного забезпечення вважають позитивними, якщо виконуються вимоги, визначені експлуатаційною документацією на установку.

Експлуатаційна документація [3] встановлює наступну методику визначення похибки програми. Обчислену програмою похибку лічильника газу, який повіряється на установці, перевіряють розрахунковим способом за формулою наведеною в [4]:

$$d = \left[ \frac{V_i}{V_0} \times \frac{P_i}{P_0} \times \frac{T_0}{T_i} - 1 \right] \times 100\%, \quad (1)$$

де  $V_i$  – об’єм, вимірний  $i$ -тим лічильником, що перевіряють, м<sup>3</sup>;  $V_0$  – об’єм, вимірний еталонним лічильником газу, м<sup>3</sup>;  $P_i$  – абсолютний тиск на вході  $i$ -того лічильника, що перевіряють, Па;  $P_0$  – абсолютний тиск на вході еталонного лічильника газу, Па;  $T_0$  – абсолютна температура на вході еталонного лічильника газу, К;  $T_i$  – абсолютна температура на вході  $i$ -того лічильника, що перевіряють, К.

Програмне забезпечення вважають таким, що витримало тестування (відповідно до [3]), якщо різниця значень відносної похибки лічильників за результатом розрахунку за формулою (1) і визначеної при перевірці лічильників на установці не перевищує  $\pm 0,1\%$ .

Методика, наведена в [3], не дозволяє визначити похибку програмного забезпечення, а лише перевірити правильність написання рівняння (1) в коді програми. Не обґрунтованим є встановлення границі похибки величиною  $\pm 0,1\%$ . Не визначаються і якісні показники програмного забезпечення еталонів об’єму газу відповідно до вимог нормативного документа [5]. Були розроблені тільки методики визначення якісних показників лічильників газу [6-8]. В жодному чинному нормативному, методичному чи експлуатаційному документі, що регламентують вимоги до технічних характеристик еталонів об’єму газу, не наведені сертифікаційні чи метрологічні моделі програмного забезпечення, що входить до складу обчислювальних компонентів цих еталонів. В роботі [9] наведені процедури оцінювання метрологічних характеристик обчислювальних компонентів вимірювальних інформаційних систем методом динамічного тестування (експериментально) і відсутня номенклатура складових похибки, що визначається при статичному тестуванні (аналізі коду програм).

**Мета статті.** Для об’єктивного визначення похибки програми необхідно виявити всі можливі невідповідності в роботі програмного забезпечення та оцінити їх вплив на похибку програми.

**Методика визначення похибки програмного забезпечення еталонів одиниці об’єму газу.** Визначити метрологічні характеристики програмного забезпечення можна під час звірення еталонів одиниці об’єму та об’ємної витрати газу за допомогою еталонів передавання, оскільки процедура звірення охоплює роботу всіх вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальної системи еталонів.

За результатами статичного тестування (перевірки програмного коду) існуючого програмного забезпечення еталонів одиниці об’єму та об’ємної

витрати газу розроблена нижчевикладена методика визначення похибки програмного забезпечення еталонів.

При кожному вимірюванні за встановленого значення об'ємної витрати проводять запис наступних параметрів:

- контрольного об'єму, що пропущено через еталон передавання ( $V_{Kj}$ ), м<sup>3</sup>;
- кількості імпульсів з еталона передавання ( $N_{ji}$ );
- надлишкового тиску в повірочній установці, що звіряється ( $P_{Ei}$ ) та перед (або на) еталоні передаванні, ( $P_{ji}$ ), Па;
- температури у еталоні ( $t_{Eji}$ ), та на виході (вході) в еталон передавання ( $t_{ji}$ ), °С
- атмосферного тиску ( $P_{aj}$ ), Па.

Для кожного  $i$ -го вимірювання за даного  $j$ -того значення об'ємної витрати проводять наступні обчислення:

- значення об'єму, що пройшов через еталон приведений до умов установки, що звіряється:

$$V_{ji} = V_{Kj} \cdot \frac{P_{aj} + P_{Eji}}{P_{aj} + P_{ji}} \cdot \frac{t_{ji} + 273,15}{t_{Eji} + 273,15}, \quad (2)$$

- коефіцієнта перетворення еталона передавання:

$$K_{ji} = \frac{N_{ji}}{V_{ji}}, \quad (3)$$

тоді

$$K_{ji} = \frac{N_{ji}}{V_{Kj}} \cdot \frac{P_{aj} + P_{ji}}{P_{aj} + P_{Eji}} \cdot \frac{t_{Eji} + 273,15}{t_{ji} + 273,15}. \quad (4)$$

Якщо програма не містить процедури вилучення промахів, тоді похибка від недостовірності вхідних даних ( $D_{H01}$ ) для кожної виміряної величини визначається за формулами:

$$D_{H01}(N) = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{N_{\max} - \overline{N_{ji}}}{\overline{N_{ji}}} \cdot 100\% \\ \frac{N_{\min} - \overline{N_{ji}}}{\overline{N_{ji}}} \cdot 100\% \end{array} \right. , \quad (5)$$

$$D_{H01}(P_a) = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{a \max} - \overline{P_{aj}}}{\overline{P_{aj}}} \cdot 100\% \\ \frac{P_{a \min} - \overline{P_{aj}}}{\overline{P_{aj}}} \cdot 100\% \end{array} \right. , \quad (6)$$

$$D_{H01}(P) = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{\max} - \overline{P_{ji}}}{\overline{P_{ji}}} \cdot 100\% \\ \frac{P_{\min} - \overline{P_{ji}}}{\overline{P_{ji}}} \cdot 100\% \end{array} \right. , \quad (7)$$

$$D_{H01}(P_E) = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{E \max} - \overline{P_{Eji}}}{\overline{P_{Eji}}} \cdot 100\% \\ \frac{P_{E \min} - \overline{P_{Eji}}}{\overline{P_{Eji}}} \cdot 100\% \end{array} \right. , \quad (8)$$

$$D_{H01}(t_E) = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_{E \max} - \overline{t_{Eji}}}{\overline{t_{Eji}}} \cdot 100\% \\ \frac{t_{E \min} - \overline{t_{Eji}}}{\overline{t_{Eji}}} \cdot 100\% \end{array} \right. , \quad (9)$$

$$D_{H01}(t) = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_{\max} - \overline{t_{ji}}}{\overline{t_{ji}}} \cdot 100\% \\ \frac{t_{\min} - \overline{t_{ji}}}{\overline{t_{ji}}} \cdot 100\% \end{array} \right. , \quad (10)$$

де  $N_{\max}, P_{\text{amax}}, P_{\max}, P_{E\max}, t_{E\max}, t_{\max}$  та  $N_{\min}, P_{\text{amin}}, P_{\min}, P_{E\min}, t_{E\min}, t_{\min}$  – максимальні та мінімальні значення вимірних величин, відповідно.

У випадку використання середньостатистичних або приблизних значень параметрів, які не вимірюються, наприклад, внесення оператором в програму середнього для даної місцевості, в якій експлуатується еталон, атмосферного (барометричного) тиску ( $D_{C01}$ ) або програмного переприсвоєння значення фізичної величини замість вимірюного якогось згенерованого або середнього значення ( $D_{\phi01}$ ), визначається за формулами:

$$D_{C01;\phi01}(N) = \frac{N_{\text{сеп},\approx,\Pi} - N_{ji}}{N_{ji}} \cdot 100\% , \quad (11)$$

$$D_{C01;\phi01}(P_a) = \frac{P_{\text{aсеп},\approx,\Pi} - P_{aj}}{P_{aj}} \cdot 100\% , \quad (12)$$

$$D_{C01;\phi01}(P) = \frac{P_{\text{сеп},\approx,\Pi} - P_{ji}}{P_{ji}} \cdot 100\% , \quad (13)$$

$$D_{C01;\phi01}(P_E) = \frac{P_{\text{Eсеп},\approx,\Pi} - P_{Ej}}{P_{Ej}} \cdot 100\% , \quad (14)$$

$$D_{C01;\phi01}(t_E) = \frac{t_{\text{Eсеп},\approx,\Pi} - t_{Ej}}{t_{Ej}} \cdot 100\% , \quad (15)$$

$$D_{C01;\phi01}(t) = \frac{t_{\text{сеп},\approx,\Pi} - t_{ji}}{t_{ji}} \cdot 100\% . \quad (16)$$

Відхилення результатів обчислень програмою у випадку використання числових методів, що відрізняються від описаних в програмній документації, визначаються за формулою:

$$\delta_{C02}(N) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } S_2 \leq S_1 \\ \frac{N_{\text{апр}2i} - N_{\text{експ}i}}{N_{\text{експ}i}} \cdot 100\%, & \text{якщо } S_2 > S_1 \end{cases}. \quad (17)$$

Середньоквадратичне відхилення (СКВ) обчислених значень фізичної величини за методом, описаним в програмній документації  $S_1$  та за методом, відтвореним в програмі  $S_2$ :

$$S_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{\text{апр}1i} - N_{\text{експ}i})^2}{n(n-1)}}, \quad (18)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{\text{апр}2i} - N_{\text{експ}i})^2}{n(n-1)}}, \quad (19)$$

де  $N_{\text{апр}1}$  та  $N_{\text{апр}2}$  – значення фізичної величини обчислені за за методом, описаним в програмній документації та за методом, відтвореним в програмі;  $N_{\text{експ}}$  – експериментальні значення,  $n$  – кількість точок вимірювання.

Відхилення внесеної в програму і отриманої за результатами метрологічної атестації градувальних характеристик датчиків фізичних величин, що використовуються в еталонах одиниці об'єму та об'ємної витрати газу, визначається за формулами:

$$\delta_{y01}(P_a) = \max\left(\frac{P_{\text{аП}i} - P_{\text{аМ}i}}{P_{\text{аМ}i}}\right) \cdot 100\%, \quad (20)$$

де  $P_{\text{аП}i}$ ,  $P_{\text{аМ}i}$  - значення фізичної величини, визначеної за формулою градувальної характеристики датчика, внесеної до програми та визначеної за результатами метрологічної атестації на  $i$ -тій точці, відповідно.

Аналогічно

$$\delta_{y01}(P) = \max\left(\frac{P_{\Pi i} - P_{Mi}}{P_{Mi}}\right) \cdot 100\%, \quad (21)$$

$$\delta_{y01}(P_E) = \max\left(\frac{P_{E\Pi i} - P_{EMi}}{P_{EMi}}\right) \cdot 100\%, \quad (22)$$

$$\delta_{y01}(t_E) = \max\left(\frac{t_{E\Pi i} - t_{EMi}}{t_{EMi}}\right) \cdot 100\%, \quad (23)$$

$$\delta_{y01}(t) = \max\left(\frac{t_{\Pi i} - t_{Mi}}{t_{Mi}}\right) \cdot 100\%. \quad (24)$$

Достатність отриманої інформації для продовження роботи оцінюється формулою:

$$\delta_{301}(P) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } l \geq n \\ \left( \frac{\sum_{i=1}^l P_i}{l} - \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \right) \cdot 100\%, & \text{якщо } l < n \\ \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \end{cases}, \quad (25)$$

де  $n$  – необхідна (достатня) кількість значень фізичної величини,  $l$  – фактична кількість отриманих значень.

$$\delta_{301}(P_E) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } l \geq n \\ \left( \frac{\sum_{i=1}^l P_{Ei}}{l} - \frac{\sum_{i=1}^n P_{Ei}}{n} \right) \cdot 100\%, & \text{якщо } l < n \\ \frac{\sum_{i=1}^n P_{Ei}}{n} \end{cases}, \quad (26)$$

$$\delta_{301}(t_E) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } l \geq n \\ \left( \frac{\sum_{i=1}^l t_{Ei}}{l} - \frac{\sum_{i=1}^n t_{Ei}}{n} \right) \cdot 100\%, & \text{якщо } l < n \\ \frac{\sum_{i=1}^n t_{Ei}}{n} \end{cases}, \quad (27)$$

$$\delta_{301}(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } l \geq n \\ \left( \frac{\sum_{i=1}^l t_i}{l} - \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \right) \cdot 100\%, & \text{якщо } l < n \\ \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \end{cases}. \quad (28)$$

Вплив кількості знаків після коми в результатах обчислень, які видаються програмою на метрологічні характеристики повірочних установок оцінюється похибкою:



$$\delta_{E01}(N) = \frac{10^{-f(N)}}{N} \cdot 100\%, \quad (29)$$

де  $f$  - наявний в результаті знак після коми.

$$\delta_{E01}(V_K) = \frac{10^{-f(V_K)}}{V_K} \cdot 100\%, \quad (30)$$

$$\delta_{E01}(P_a) = \frac{10^{-f(P_a)}}{P_a} \cdot 100\%, \quad (31)$$

$$\delta_{E01}(P) = \frac{10^{-f(P)}}{P} \cdot 100\%, \quad (32)$$

$$\delta_{E01}(P_E) = \frac{10^{-f(P_E)}}{P_E} \cdot 100\%, \quad (33)$$

$$\delta_{E01}(t_E) = \frac{10^{-f(t_E)}}{t_E} \cdot 100\%, \quad (34)$$

$$\delta_{E01}(t) = \frac{10^{-f(t)}}{t} \cdot 100\%, \quad (35)$$

$$\delta_{E01}(K) = \frac{10^{-f(K)}}{K} \cdot 100\%. \quad (36)$$

Границя невиключеної систематичної похибки (НСП) програмного забезпечення еталонів об'єму та об'ємної витрати газу визначається за формулою:

$$\Theta = \pm 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial N} \cdot d_1(N)\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial P_a} \cdot d_1(P_a)\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial P} \cdot d_1(P)\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial P_E} \cdot d_1(P_E)\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial t_E} \cdot d_1(t_E)\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial t} \cdot d_1(t)\right)^2}, \quad (37)$$

де

$$\frac{\partial K}{\partial N} = \frac{1}{V_{Kj}} \cdot \frac{P_{aj} + P_{ji}}{P_{aj} + P_{Eji}} \cdot \frac{t_{Eji} + 273,15}{t_{ji} + 273,15}, \quad (38)$$

$$\frac{\partial K}{\partial P_a} = \frac{N_{ji}}{V_{Kj}} \cdot \frac{P_{Eji} - P_{ji}}{(P_{aj} + P_{Eji})^2} \cdot \frac{t_{Eji} + 273,15}{t_{ji} + 273,15}, \quad (39)$$

$$\frac{\partial K}{\partial P_{ji}} = \frac{N_{ji}}{V_{Kj}} \cdot \frac{1}{P_{aj} + P_{Eji}} \cdot \frac{t_{Eji} + 273,15}{t_{ji} + 273,15}, \quad (40)$$

$$\frac{\partial K}{\partial P_{Eji}} = -\frac{N_{ji}}{V_{Kj}} \cdot \frac{P_{aj} + P_{ji}}{(P_{aj} + P_{Eji})^2} \cdot \frac{t_{Eji} + 273,15}{t_{ji} + 273,15}, \quad (41)$$

$$\frac{\partial K}{\partial t_{Eji}} = \frac{N_{ji}}{V_{Kj}} \cdot \frac{P_{aj} + P_{ji}}{P_{aj} + P_{Eji}} \cdot \frac{1}{t_{ji} + 273,15}, \quad (42)$$

$$\frac{\partial K}{\partial t_{ji}} = -\frac{N_{ji}}{V_{Kj}} \cdot \frac{P_{aj} + P_{ji}}{P_{aj} + P_{Eji}} \cdot \frac{t_{Eji} + 273,15}{(t_{ji} + 273,15)^2}, \quad (43)$$

$$D_1(N) = \sqrt{(D_{H01}(N))^2 + (D_{C01;\Phi01}(N))^2}, \quad (44)$$

$$D_1(P_a) = \sqrt{(D_{H01}(P_a))^2 + (D_{C01;\Phi01}(P_a))^2}, \quad (45)$$

$$D_1(P) = \sqrt{(D_{H01}(P))^2 + (D_{C01;\Phi01}(P))^2}, \quad (46)$$

$$D_1(P_E) = \sqrt{(D_{H01}(P_E))^2 + (D_{C01;\Phi01}(P_E))^2}, \quad (47)$$

$$D_1(t_E) = \sqrt{(D_{H01}(t_E))^2 + (D_{C01;\Phi01}(t_E))^2}, \quad (48)$$

$$D_1(t) = \sqrt{(D_{H01}(t))^2 + (D_{C01;\Phi01}(t))^2}. \quad (49)$$

Обчислення за формулами (44) – (49) проводяться із врахуванням формул (5) – (16).

Середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання (СКВ) визначається за формулою:

$$S = \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial N}\right)^2 \cdot (D_2(N))^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial P_a}\right)^2 \cdot (D_2(P_a))^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial P}\right)^2 \cdot (D_2(P))^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial P_E}\right)^2 \cdot (D_2(P_E))^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial t_E}\right)^2 \cdot (D_2(t_E))^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial t}\right)^2 \cdot (D_2(t))^2}, \quad (50)$$

де

$$D_2(N) = D_{C02}(N), \quad (51)$$

$$D_2(P_a) = D_{V01}(P_a), \quad (52)$$

$$D_2(P) = \sqrt{(D_{V01}(P))^2 + (D_{301}(P))^2}, \quad (53)$$

$$D_2(P_E) = \sqrt{(D_{V01}(P_E))^2 + (D_{301}(P_E))^2}, \quad (54)$$

$$D_2(t_E) = \sqrt{(D_{V01}(t_E))^2 + (D_{301}(t_E))^2}, \quad (55)$$

$$D_2(t) = \sqrt{(D_{V01}(t))^2 + (D_{301}(t))^2}. \quad (56)$$

Часткові похідні у формулі (50) визначаються за формулами (38) – (43), а обчислення за формулами (51) – (56) проводяться із врахуванням формул (17), (20) – (28).

Середнє квадратичне відхилення суми невиключених систематичних і випадкових похибок програмного забезпечення, з врахуванням формул (37) і (50), визначається за формулою:

$$S_\Sigma = \sqrt{S^2 + \frac{\Theta^2}{3}}. \quad (57)$$

Похибка програмного забезпечення, з врахуванням формул (29) - (36) і (57), визначається за формулою:

$$D_{ПЗ} = \sqrt{(S_\Sigma)^2 + \sum_{i=1}^8 (D_{E01})_i^2}. \quad (58)$$

**Висновки.** Розроблена методика може бути складовою частиною методичних документів [1,2] та інших чинних, в тому числі експлуатаційних документів, що поширюються на еталони одиниць об'єму та об'ємної витрати газу.

Предметом подальших наукових досліджень буде розроблення методики визначення метрологічних характеристик програмного забезпечення вимірювальних комплексів, коректорів та обчислювачів об'єму газу.

**Список літератури:** 1. Метрологія. Установки повірочні дзвонового типу. Типова програма та методика державної метрологічної атестації: МДУ 025/03-2006. - [Чинний від 2006-05-18]. – Івано-Франківськ: Івано-Франківськстандартметрологія 2006. – 47 с. – (Методичний документ з метрології). 2. Метрологія. Робочі еталони об'єму газу типу РVТ. Програма і методика державної метрологічної атестації. - [Чинний від 2004-04-27]. – Івано-Франківськ: Івано-Франківськстандартметрологія 2004. – 13 с. – (Методичний документ з метрології). 3. 562.М.Т.407368.024-24 НЕ Установа комп'ютеризована для визначення та контролю метрологічних характеристик побутових лічильників газу „Темпо-3”МР. Настанова з експлуатації. 4. Метрологія. Лічильники газу побутові. Методи та засоби повірки: Р 50-071-98. - [Чинний від 1999-01-01]. – К: Держстандарт України 1998. – 26 с. – (Рекомендації). 5. Оценка качества программных средств. Общие положения: ГОСТ 28195-89. – [Чинний від 1990-07-01]. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 48 с. – (Міждержавний стандарт). 6. *Середюк Д.О.* Методика визначення коефіцієнтів вагомості складових комплексного показника якості лічильників газу// Методи та прилади контролю якості/ *Д.О. Середюк, І.С. Кісіль.* – 2005. - №15. – С. 12-15. 7. *Середюк Д.О.* Математична модель діагностування технічного стану побутових лічильників газу// Наукові вісті Галицької Академії/ *Д.О. Середюк, О.Є. Середюк, В.В. Костинюк.* – 2005.- №2(8). – С. 17-22. 8. *Петришин І.С.* Сертифікаційна модель лічильника газу// Методи та прилади контролю якості/ *І.С. Петришин.* - 2000. - №5. – С. 54-57. 9. *Кричевець О.* Метрологічне забезпечення обчислювальних компонентів вимірювальних інформаційних систем// Метрологія та прилади/ *О. Кричевець.* – 2012. – №2. – С. 37-42.

Стаття подана д.т.н. проф. ІФНТУНГ Середюком О.Є.