

рекурентним методом // *Материалы XIII Международной НТК «Приборостроение-2004»*. – Винница–Корейс, 2004. – С. 68-71. 3. Мичуда З.Р. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі – АЦП майбутнього. – Львів: Простір, 2002. – 242 с. 4. Мичуда Л.З., Мичуда З.Р. Аналогові функціональні перетворювачі на комутованих конденсаторах для систем енергообліку // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2005. – №3. – С.184–186. 5. Дудикевич В.Б., Мичуда З.Р., Мичуда Л.З. Аналоговий багатофункціональний перетворювач на основі перерозподілу заряду // *Наукові праці конф. “Комп’ютерні технології друкарства: алгоритми, сигнали, системи”*, ДРУКОТЕХН-96. – Львів: Українська академія друкарства, 1996. – С. 115. 6. Мичуда Л.З. Найпростіший аналоговий функціональний перетворювач на комутованих конденсаторах // *Вісник Державного університету “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”*. – 1999. – №348. – С. 85–89. 7. Мичуда Л.З., Мичуда З.Р. Аналого-цифровий багатофункціональний перетворювач // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація”*. – 2002. – №460. – С. 66–72.

УДК 681.121.84:006.9

Л.В. Лесовой

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

РОЗРАХУНОК НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТУ ВИМІРЮВАНЬ ВИТРАТИ І КІЛЬКОСТІ СУХОЇ ЧАСТИНИ ВОЛОГОГО ГАЗУ ЗА МЕТОДОМ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

© Лесовой Л.В., 2010

Розглянуто методику розрахунку невизначеності результату вимірювань витрати і кількості сухої частини вологого газу за методом змінного перепаду тиску.

This paper deals with method for calculation of measurements uncertainty at flowrate and volume measurements by means of the pressure differential device for dry part of humid gas.

Постановка проблеми. Найпоширенішим методом вимірювання витрати та кількості природного газу (далі газ) є метод змінного перепаду тиску. За допомогою цього методу можна вимірювати не тільки витрату і кількість сухого газу, але також витрату і кількість сухої частини вологого газу. Збільшення вологості у газі зменшує його питому теплоту згоряння, а отже, і витрату енерговмісту газу. Витрата енерговмісту газу залежить від витрати газу. У багатьох країнах світу виконують розрахунки не за кількістю газу, яку отримав споживач, а за його енерговмістом. Тому проблема вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу є актуальною проблемою сьогодення. Алгоритм розрахунку витрати та кількості як сухого, так і сухої частини вологого газу, за допомогою методу змінного перепаду тиску із стандартними звужувальними пристроями описані в ДСТУ 8.586:2009 [1–5]. Розрахунок же невизначеностей результату вимірювань витрати та кількості газу наведений у цих стандартах тільки для сухого газу. Враховуючи вищесказане, виникає необхідність, застосовуючи вимоги стандарту [5], одержати рівняння для розрахунку невизначеності результату вимірювань витрати та кількості сухої частини вологого газу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. До введення стандартів [1–5] розрахунок невизначеності (середньої квадратичної відносної похибки) результату вимірювань витрати та кількості сухої частини вологого газу нормувався тільки нормативним документом РД50-213-80

[6]. Питання розрахунку витрати та кількості сухої частини вологого газу, а також невизначеності результату вимірювань витрати і кількості сухої частини вологого газу також розглядалося в [7]. Проведеними дослідженнями було встановлено, що невизначеності результатів вимірювань витрати та кількості сухої частини вологого газу давали завищені значення [6, 7] або зовсім були відсутні [8].

Формулювання цілі статті. Мета роботи – сформулювати основні засади та отримати рівняння для розрахунку невизначеності результату вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу за методом змінного перепаду тиску.

Виклад основного матеріалу. Оскільки сухий газ є одним із випадків вологого газу (за нульового значення вологості), то запишемо рівняння для визначення об'ємної витрати $q_{c_{cr}}$ сухої частини вологого газу, зведеної до стандартних умов, як [5, 7]:

$$q_{c_{cr}} = q_{c_{вг}} \frac{\rho_{c_{cr}}}{\rho_{вг}}, \quad (1)$$

де $\rho_{вг}$ – густина вологого газу в робочих умовах (в абсолютному тиску p та термодинамічній температурі T); $\rho_{c_{cr}}$ – густина сухої частини вологого газу.

Вологість газу характеризується такими параметрами, як:

– відносна вологість ϕ газу, яка визначається як відношення густини $\rho_{вп}$ водяної пари у вологому газі до найбільшої можливої густини $\rho_{вп\max}$ пари за робочих умов і розраховується за рівнянням

$$\phi = \frac{\rho_{вп}(T)}{\rho_{вп\max}(T)}, \quad (2)$$

де T – термодинамічна температура газу, яку визначають за рівнянням

$$T = t + 273,15; \quad (3)$$

– абсолютна вологість f газу, яка виражається масою водяної пари (в кг) в 1 м^3 вологого газу за робочих умов і розраховується за рівнянням

$$f = \phi \cdot \rho_{вп\max}(T). \quad (4)$$

Густина $\rho_{c_{cr}}$ сухої частини вологого газу визначається за рівнянням [5, 7]:

– якщо задана абсолютна вологість f газу

$$\rho_{c_{cr}} = \rho_{вг} - f; \quad (5)$$

– якщо задана відносна вологість ϕ газу

$$\rho_{c_{cr}} = \rho_{вг} - \phi \rho_{вп\max}. \quad (6)$$

Якщо термодинамічна температура T газу не перевищує температуру насичення водяної пари $T_{нас}$, яка відповідає абсолютному тиску p газу, то густину $\rho_{вп\max}$ приймають такою, що дорівнює густині насиченої водяної пари $\rho_{нп}$.

Якщо термодинамічна температура T газу перевищує температуру насичення водяної пари $T_{нас}$, яка відповідає абсолютному тиску p газу, то густину $\rho_{вп\max}$ приймають такою, що дорівнює густині перегрітої водяної пари $\rho_{пп}$, яку розраховують за значеннями термодинамічної температури T і абсолютного тиску p газу.

З іншого боку, густину сухої частини вологого газу можна також визначати за рівнянням

$$\rho_{c_{cr}} = \rho_c \frac{p_{c_{cr}} T_c}{p_c T K}, \quad (7)$$

де ρ_c – густина газу за стандартних умов (абсолютного тиску газу $p_c = 101325 \text{ Па}$ та термодинамічної температури газу $T_c = 293,15 \text{ К}$); $p_{c_{cr}}$ – абсолютний тиск сухого газу, значення якого розраховують за рівнянням

– якщо задана абсолютна вологість f газу

$$p_{сг} = p - f \frac{p_{вп\max}}{\rho_{вп\max}}; \quad (8)$$

– якщо задана відносна вологість ϕ газу [5, 7]

$$p_{сг} = p - \phi p_{вп\max}; \quad (9)$$

K – коефіцієнт стисливості сухого газу за абсолютного тиску газу $p_{сг}$ і термодинамічної температури газу T ; p – абсолютний тиск вологого газу; $p_{вп\max}$ – максимально можливий абсолютний тиск водяної пари за температури газу t .

Значення об'ємної витрати вологого газу, приведеної до стандартних умов, розраховують за рівнянням [5 – 7]

$$q_{свг} = \frac{\pi}{4} d^2 C E K_{ш} K_{п} \varepsilon \sqrt{2 \Delta p \rho_{вг}} \frac{1}{\rho_c}, \quad (10)$$

де d – діаметр отвору або горловини звужувального пристрою за робочої температури t ; C – коефіцієнт витікання; E – коефіцієнт швидкості входу, значення якого розраховують за рівнянням [1, 7]

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}; \quad (11)$$

$K_{ш}$ – поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу (для еліптичних сопел і труб Вентурі будь-якого типу $K_{ш} = 1$); $K_{п}$ – поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми (для сопел і труб Вентурі будь-якого типу $K_{п} = 1$); ε – коефіцієнт розширення газу; Δp – перепад тиску на звужувальному пристрої; D – внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу за робочої температури t .

Підставивши рівняння (10) і (7) та врахувавши рівняння (5) і (8) або рівняння (6) і (9) у рівняння (1), отримаємо рівняння для визначення об'ємної витрати сухої частини вологого газу, приведеної до стандартних умов:

– якщо задана абсолютна вологість f газу

$$q_{сг} = \frac{\pi}{4} d^2 C E K_{ш} K_{п} \varepsilon \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{1 + \frac{f}{\rho_c} \left(p - \frac{f}{\rho_{вп\max}} p_{вп\max} \right) T_c} \cdot \frac{\left(p - \frac{f}{\rho_{вп\max}} p_{вп\max} \right) T_c}{\rho_c p_c T K}}}; \quad (12)$$

– якщо задана відносна вологість ϕ газу

$$q_{сг} = \frac{\pi}{4} d^2 C E K_{ш} K_{п} \varepsilon \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{1 + \phi \frac{\rho_{вп\max}}{\rho_c} \frac{p_c T K}{(p - \phi p_{вп\max}) T_c}} \cdot \frac{(p - \phi p_{вп\max}) T_c}{\rho_c p_c T K}}}. \quad (13)$$

Застосовуючи рівняння (12) і (13), виведемо рівняння для розрахунку невизначеності результату вимірювань витрати та кількості сухої частини вологого газу.

Достовірність результатів вимірювання витрати та кількості середовища оцінюють невизначеністю результату вимірювань витрати та кількості середовища.

Невизначеністю називають параметр, пов'язаний з результатом вимірювань, який характеризує розсіяння значень, що могли б бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині.

Розширеною невизначеністю називають величину, яка визначає інтервал навколо результату вимірювання, в межах якого можна очікувати, що міститься більша частина розподілу значень, які з достатньою підставою могли би бути приписані вимірюваній величині [5].

Відносну розширену невизначеність $U'_{q_{\text{ср}}}$ результату вимірювань об'ємної витрати сухої частини вологого газу, приведеної до стандартних умов, яку визначають непрямим методом і пов'язаною функціональною залежністю з коефіцієнтами та параметрами, що входять до рівнянь витрати (12) і (13), обчислюють за рівнянням:

- якщо задана абсолютна вологість f газу

$$U'_{q_{\text{ср}}} = \left[(\vartheta_d U'_d)^2 + (\vartheta_D U'_D)^2 + (\vartheta_C U'_C)^2 + (\vartheta_{K_{\text{ш}}} U'_{K_{\text{ш}}})^2 + (\vartheta_{K_{\text{п}}} U'_{K_{\text{п}}})^2 + (\vartheta_{\varepsilon} U'_{\varepsilon})^2 + (\vartheta_{\Delta p} U'_{\Delta p})^2 + (\vartheta_p U'_p)^2 + (\vartheta_T U'_T)^2 + (\vartheta_{\rho_c} U'_{\rho_c})^2 + (\vartheta_K U'_K)^2 + (\vartheta_{\rho_{\text{впmax}}} U'_{\rho_{\text{впmax}}})^2 + (\vartheta_{p_{\text{впmax}}} U'_{p_{\text{впmax}}})^2 + (\vartheta_f U'_f)^2 \right]^{0,5}; \quad (14)$$

- якщо задана відносна вологість φ газу

$$U'_{q_{\text{ср}}} = \left[(\vartheta_d U'_d)^2 + (\vartheta_D U'_D)^2 + (\vartheta_C U'_C)^2 + (\vartheta_{K_{\text{ш}}} U'_{K_{\text{ш}}})^2 + (\vartheta_{K_{\text{п}}} U'_{K_{\text{п}}})^2 + (\vartheta_{\varepsilon} U'_{\varepsilon})^2 + (\vartheta_{\Delta p} U'_{\Delta p})^2 + (\vartheta_p U'_p)^2 + (\vartheta_T U'_T)^2 + (\vartheta_{\rho_c} U'_{\rho_c})^2 + (\vartheta_K U'_K)^2 + (\vartheta_{\rho_{\text{впmax}}} U'_{\rho_{\text{впmax}}})^2 + (\vartheta_{p_{\text{впmax}}} U'_{p_{\text{впmax}}})^2 + (\vartheta_{\varphi} U'_{\varphi})^2 \right]^{0,5}, \quad (15)$$

де $U'_d, U'_D, U'_C, U'_{K_{\text{ш}}}, U'_{K_{\text{п}}}, U'_{\varepsilon}, U'_{\Delta p}, U'_p, U'_T, U'_{\rho_c}, U'_K, U'_{\rho_{\text{впmax}}}, U'_{p_{\text{впmax}}}, U'_f, U'_{\varphi}$ – відносні розширені невизначеності результатів розрахунку або вимірювання відповідно діаметра отвору або горловини звужувального пристрою за робочої температури, внутрішнього діаметра трубопроводу за робочої температури, коефіцієнта витікання, поправкового коефіцієнта, що враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу, поправкового коефіцієнта, що враховує притуплення вхідного канта діафрагми, коефіцієнта розширення, перепаду тиску на звужувальному пристрої, абсолютного тиску газу, термодинамічної температури газу, густини газу за стандартних умов, коефіцієнта стисливості, густини водяної пари у газі, тиску водяної пари, абсолютної вологості газу, відносної вологості газу; $\vartheta_d, \vartheta_D, \vartheta_C, \vartheta_{K_{\text{ш}}}, \vartheta_{K_{\text{п}}}, \vartheta_{\varepsilon}, \vartheta_{\Delta p}, \vartheta_p, \vartheta_T, \vartheta_{\rho_c}, \vartheta_K, \vartheta_{\rho_{\text{впmax}}}, \vartheta_{p_{\text{впmax}}}, \vartheta_f, \vartheta_{\varphi}$ – відносні коефіцієнти чутливості масової витрати сухої частини вологого газу до зміни відповідно до діаметра отвору або горловини звужувального пристрою за робочої температури, внутрішнього діаметра трубопроводу за робочої температури, коефіцієнта витікання, поправкового коефіцієнта, що враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу, поправкового коефіцієнта, що враховує притуплення вхідного канта діафрагми, коефіцієнта розширення, перепаду тиску на звужувальному пристрої, абсолютного тиску газу, термодинамічної температури газу, густини газу за стандартних умов, коефіцієнта стисливості, густини водяної пари у газі, тиску водяної пари, абсолютної вологості газу, відносної вологості газу.

Значення відносного коефіцієнта чутливості ϑ_{y_i} об'ємної витрати сухої частини вологого газу, приведеної до стандартних умов, до зміни i -го коефіцієнта або параметра y_i визначається за рівнянням [5, 7]

$$\vartheta_{y_i} = \frac{\partial q_{\text{ср}}}{\partial y_i} \frac{y_i}{q_{\text{ср}}}, \quad (16)$$

де $\frac{\partial q_{\text{ср}}}{\partial y_i}$ – часткова похідна об'ємної витрати $q_{\text{ср}}$ сухої частини вологого газу, приведеної до стандартних умов, по коефіцієнту або параметру y_i .

Застосовуючи рівняння (16), визначимо відносні коефіцієнти чутливості до зміни i -го коефіцієнта або параметра, який входить у рівняння витрати середовища (12) або (13), і запишемо їх у вигляді:

$$\vartheta_d = \frac{2}{1-\beta^4}; \quad (17)$$

$$\vartheta_D = \frac{2\beta^4}{1-\beta^4}; \quad (18)$$

$$\vartheta_C = \vartheta_{K_{ш}} = \vartheta_{K_{п}} = \vartheta_{\varepsilon} = 1; \quad (19)$$

$$\vartheta_{\Delta p} = 0,5; \quad (20)$$

– якщо задана абсолютна вологість f газу

$$\vartheta_p = 0,5 \frac{1}{1 - \frac{f}{\rho_{вп\max}} \frac{p}{\rho_{вг}}} \left(1 + \frac{f}{\rho_{вг}} \right); \quad (21)$$

$$\vartheta_T = \vartheta_K = -0,5 \left(1 + \frac{f}{\rho_{вг}} \right); \quad (22)$$

$$\vartheta_{\rho_c} = -0,5 \left(1 - \frac{f}{\rho_{вг}} \right); \quad (23)$$

$$\vartheta_f = -0,5 \frac{f}{\rho_{вп\max}} \frac{1}{1 - \frac{f}{\rho_{вп\max}} \frac{p}{\rho_{вг}}} \left(\frac{\rho_{вп\max}}{p} + \frac{f}{\rho_{вг}} \right); \quad (24)$$

$$\vartheta_{\rho_{вп\max}} = 0,5 \frac{f}{\rho_{вп\max}} \frac{\rho_{вп\max}}{p - \frac{f\rho_{вп\max}}{\rho_{вг}}} \left(1 + \frac{f}{\rho_{вг}} \right); \quad (25)$$

$$\vartheta_{p_{вп\max}} = -0,5 \frac{f}{\rho_{вп\max}} \frac{\rho_{вп\max}}{p - \frac{f\rho_{вп\max}}{\rho_{вг}}} \left(1 + \frac{f}{\rho_{вг}} \right); \quad (26)$$

– якщо задана відносна вологість φ газу

$$\vartheta_p = 0,5 \frac{p}{p - \varphi\rho_{вп\max}} \left(1 + \varphi \frac{\rho_{вп\max}}{\rho_{вг}} \right); \quad (27)$$

$$\vartheta_T = \vartheta_K = -0,5 \left(1 + \varphi \frac{\rho_{вп\max}}{\rho_{вг}} \right); \quad (28)$$

$$\vartheta_{\rho_c} = -0,5 \left(1 - \varphi \frac{\rho_{вп\max}}{\rho_{вг}} \right); \quad (29)$$

$$\vartheta_{\varphi} = -0,5 \frac{\varphi p}{p - \varphi\rho_{вп\max}} \left(\frac{\rho_{вп\max}}{p} + \varphi \frac{\rho_{вп\max}}{\rho_{вг}} \right); \quad (30)$$

$$\vartheta_{\rho_{вп\max}} = -0,5 \frac{\varphi\rho_{вп\max}}{\rho_{вг}}; \quad (31)$$

$$\vartheta_{p_{вп\max}} = -0,5\varphi \frac{\rho_{вп\max}}{p - \varphi\rho_{вп\max}} \left(1 + \frac{\varphi\rho_{вп\max}}{\rho_{вг}} \right), \quad (32)$$

де β – відносний діаметр звукувального пристрою, значення якого розраховують за рівнянням [1,7]

$$\beta = \frac{d}{D}.$$

Густина $\rho_{\text{вг}}$ вологого газу у рівняннях (21)–(26) визначається з рівняння (5), а у рівняннях (27)–(32) – з рівняння (6).

Підставивши рівняння для визначення відносних коефіцієнтів чутливості (17) – (32) у рівняння (14) і (15), отримаємо рівняння для визначення відносної розширеної невизначеності результату вимірювань об'ємної витрати сухої частини вологого газу, приведені до стандартних умов:

– якщо задана абсолютна вологість f газу

$$\begin{aligned}
 U'_{q_{\text{сг}}} = & \left\{ \left(\frac{2}{1-\beta^4} U'_d \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_{\text{ш}}} + U'^2_{K_{\text{п}}} + U'^2_{\varepsilon} + \right. \\
 & + \frac{1}{4} \left[U'^2_{\Delta p} + \left[\frac{1}{1 - \frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \frac{P_{\text{вп max}}}{P}} \left(1 + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 U'^2_P + \left(1 + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 (U'^2_T + U'^2_K) + \right. \\
 & + \left(1 - \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 U'^2_{\rho_c} + \left[\frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \cdot \frac{P_{\text{вп max}}}{P - \frac{f P_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вп max}}}} \left(1 + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 (U'^2_{\rho_{\text{вп max}}} + U'^2_{P_{\text{вп max}}}) + \\
 & \left. \left. + \left[\frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \frac{P_{\text{вп max}}}{P}} \left(\frac{P_{\text{вп max}}}{P} + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 U'^2_f \right] \right\}^{0,5}; \quad (33)
 \end{aligned}$$

– якщо задана відносна вологість φ газу

$$\begin{aligned}
 U'_{q_{\text{сг}}} = & \left\{ \left(\frac{2}{1-\beta^4} U'_d \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_{\text{ш}}} + U'^2_{K_{\text{п}}} + U'^2_{\varepsilon} + \right. \\
 & + \frac{1}{4} \left[U'^2_{\Delta p} + \left[\frac{P}{P - \varphi P_{\text{вп max}}} \left(1 + \varphi \frac{P_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 U'^2_P + \left(1 + \varphi \frac{P_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 (U'^2_T + U'^2_K) + \right. \\
 & + \left(1 - \varphi \frac{P_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 U'^2_{\rho_c} + \left[\varphi \frac{P_{\text{вп max}}}{P - \varphi P_{\text{вп max}}} \left(1 + \frac{\varphi P_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 U'^2_{P_{\text{вп max}}} + \\
 & \left. \left. + \left(\frac{\varphi P_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 U'^2_{\rho_{\text{вп max}}} + \left[\frac{\varphi P}{P - \varphi P_{\text{вп max}}} \left(\frac{P_{\text{вп max}}}{P} + \varphi \frac{P_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 U'^2_{\varphi} \right] \right\}^{0,5}. \quad (34)
 \end{aligned}$$

Для сухого газу, коли значення абсолютної або відносної вологості дорівнюють нулю, рівняння (33) і (34) перетворюються у рівняння для розрахунку значення відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати сухого газу [5, 7], а саме:

$$U'_{q_{\text{сг}}} = \left\{ \left(\frac{2}{1-\beta^4} U'_d \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_{\text{ш}}} + U'^2_{K_{\text{п}}} + U'^2_{\varepsilon} + \frac{1}{4} [U'^2_{\Delta p} + U'^2_P + U'^2_T + U'^2_{\rho_c} + U'^2_K] \right\}^{0,5}. \quad (35)$$

Відносна розширена невизначеність результату вимірювання витрати сухої частини вологого газу залежить від конфігурації витратоміра. Витратоміри змінного перепаду тиску поділяються на:

- витратоміри з роздільним вимірюванням параметрів потоку;
- витратоміри з обчислювачем витрати та кількості сухої частини вологого газу;
- вимірювальні комплекси.

Під час вимірювання витрати сухої частини вологого газу витратомірами з роздільним вимірюванням параметрів потоку значення відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати сухої частини вологого газу розраховують за рівнянням (33), (34) або (35).

Під час вимірювання витрати сухої частини вологого газу за допомогою витратомірів з обчислювачем витрати та кількості сухої частини вологого газу необхідно враховувати невизначеність результату розрахунку витрати цим обчислювачем U'_{K_q} . Невизначеність U'_{K_q} встановлюють за паспортними даними обчислювача витрати. Відносна розширена невизначеність $U'_{q_{\text{сг}} \text{ овк}}$ результату вимірювань витрати сухої частини вологого газу із застосуванням витратоміра з обчислювачем витрати та кількості розраховується за рівнянням

$$U'_{q_{\text{сг}} \text{ овк}} = \left(U'^2_{K_q} + U'^2_{q_{\text{сг}}} \right)^{0,5}. \quad (36)$$

У разі застосування вимірювальних комплексів, для яких похибка нормована з врахуванням похибок обчислювача і засобів вимірювань параметрів потоку газу Δp , p і T , відносні розширені невизначеності $U'_{\Delta p}$, U'_p і U'_T приймаються такими, що дорівнюють нулю, і не враховуються під час розрахунку значень відносних розширених невизначеностей U'_ε , U'_K та значення відносної розширеної невизначеності U'_K показника адиабати κ газу, який входить у рівняння коефіцієнта розширення ε газу. При цьому необхідно врахувати складник відносної розширеної невизначеності U'_{oq} результату вимірювань витрати сухої частини вологого газу, який вноситься вимірювальним комплексом з врахуванням складових невизначеностей результатів вимірювання Δp , p і T і нормується в діапазонах визначення цих параметрів. Відносна розширена невизначеність $U'_{q_{\text{сг}} \text{ вк}}$ результату вимірювань витрати сухої частини вологого газу із застосуванням вимірювального комплексу розраховується за рівняннями:

– якщо задана абсолютна вологість f газу

$$U'_{q_{\text{сг}} \text{ вк}} = \left\{ U'^2_{oq} + \left(\frac{2}{1-\beta^4} U'_d \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_{\text{ш}}} + U'^2_{K_{\text{п}}} + U'^2_\varepsilon + \frac{1}{4} \left[\left(1 + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 U'^2_K + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(1 - \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 U'^2_{\rho_c} + \left[\frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \cdot \frac{\rho_{\text{вп max}}}{p - \frac{f \rho_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вп max}}} \left(1 + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right)} \right]^2 \left(U'^2_{\rho_{\text{вп max}}} + U'^2_{p_{\text{вп max}}} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left[\frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \frac{\rho_{\text{вп max}}}{p} \left(\frac{\rho_{\text{вп max}}}{p} + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right)} \right]^2 U'^2_f \right] \right\}^{0,5}; \quad (37)$$

– якщо задана відносна вологість φ газу

$$U'_{q_{c_{cr}}BK} = \left\{ U'_{Oq}{}^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} U'_d \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_{ш}}{}^2 + U'_{K_{п}}{}^2 + U'_\varepsilon{}^2 + \frac{1}{4} \left[\left(1 + \varphi \frac{\rho_{впmax}}{\rho_{вг}} \right)^2 U'_K{}^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(1 - \varphi \frac{\rho_{впmax}}{\rho_{вг}} \right)^2 U'_{\rho_c}{}^2 + \left[\varphi \frac{\rho_{впmax}}{p - \varphi \rho_{впmax}} \left(1 + \frac{\varphi \rho_{впmax}}{\rho_{вг}} \right) \right]^2 U'_{\rho_{впmax}}{}^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{\varphi \rho_{впmax}}{\rho_{вг}} \right)^2 U'_{\rho_{впmax}}{}^2 + \left[\frac{\varphi p}{p - \varphi \rho_{впmax}} \left(\frac{\rho_{впmax}}{p} + \varphi \frac{\rho_{впmax}}{\rho_{вг}} \right) \right]^2 U'_{\varphi}{}^2 \right] \right\}^{0,5}. \quad (38)$$

Об'єм $V_{c_{cr}}$ сухої частини вологого газу, приведений до стандартних умов, який пройшов по вимірювальному трубопроводу за одиницю часу, являє собою інтеграл функції об'ємної витрати $q_{c_{cr}}(\tau)$ сухої частини вологого газу, приведеної до стандартних умов, в часі τ і визначається за рівнянням

$$V_{c_{cr}} = \int_{\tau_{п}}^{\tau_{к}} q_{c_{cr}}(\tau) d\tau, \quad (39)$$

де $\tau_{п}$ і $\tau_{к}$ – час початку і кінця періоду часу інтегрування відповідно.

Під час вимірювання кількості сухої частини вологого газу витратомірами з роздільним вимірюванням параметрів потоку за результатами планіметрування діаграм або показами інтегруючих пристроїв відносна розширена невизначеність результату розрахунку кількості розраховуватиметься за рівняннями:

– якщо задана абсолютна вологість f газу

$$U'_{V_{c_{cr}}} = \left\{ U'_{q_{c_{cr}}}{}^2 + U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{\rho}{}^2 + U'_{T}{}^2 + \frac{1}{4} \left[U'_{\tau \Delta p}{}^2 + U'_{nl \Delta p}{}^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \left[\frac{1}{1 - \frac{f}{\rho_{впmax}} \frac{\rho_{впmax}}{p}} \left(1 + \frac{f}{\rho_{вг}} \right) \right]^2 \left(U'_{\tau p}{}^2 + U'_{nl p}{}^2 \right) + \left(1 + \frac{f}{\rho_{вг}} \right)^2 \left(U'_{\tau T}{}^2 + U'_{nl T}{}^2 \right) \right] \right\}^{0,5}; \quad (40)$$

– якщо задана відносна вологість φ газу

$$U'_{V_{c_{cr}}} = \left\{ U'_{q_{c_{cr}}}{}^2 + U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{\rho}{}^2 + U'_{T}{}^2 + \frac{1}{4} \left[U'_{\tau \Delta p}{}^2 + U'_{nl \Delta p}{}^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \left[\frac{p}{p - \varphi \rho_{впmax}} \left(1 + \varphi \frac{\rho_{впmax}}{\rho_{вг}} \right) \right]^2 \left(U'_{\tau p}{}^2 + U'_{nl p}{}^2 \right) + \left(1 + \varphi \frac{\rho_{впmax}}{\rho_{вг}} \right)^2 \left(U'_{\tau T}{}^2 + U'_{nl T}{}^2 \right) \right] \right\}^{0,5}, \quad (41)$$

де $U'_{\Delta p}$, U'_{ρ} , U'_{T} – відносна розширена невизначеність результату визначення середнього значення витрати сухої частини вологого газу за заданий інтервал часу, зумовлений усередненням відповідно Δp , ρ і T ; $U'_{\tau \Delta p}$, $U'_{\tau p}$, $U'_{\tau T}$ – відносна розширена невизначеність ходу діаграми запису відповідно Δp , ρ і T ; $U'_{nl \Delta p}$, $U'_{nl p}$, $U'_{nl T}$ – відносна розширена невизначеність результату планіметрування діаграми запису відповідно Δp , ρ і T .

Під час вимірювання кількості сухої частини вологого газу за допомогою обчислювачів витрати та кількості відносна розширена невизначеність результату вимірювання кількості цього середовища розраховуватиметься за рівняннями:

– якщо задана абсолютна вологість f газу

$$U'_{V_{\text{сг}}} = \left\{ U'^2_{q_{\text{сг,овк}}} + U'^2_{\tau} + \frac{1}{4} \left[U'^2_{\Delta p} + \left[\frac{1}{1 - \frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \frac{p_{\text{вп max}}}{p}} \left(1 + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 U'^2_{\Delta p} + \left(1 + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 U'^2_{\Delta T} \right] \right\}^{0,5} \quad ;(42)$$

– якщо задана відносна вологість φ газу

$$U'_{V_{\text{сг}}} = \left\{ U'^2_{q_{\text{сг,овк}}} + U'^2_{\tau} + \frac{1}{4} \left[U'^2_{\Delta p} + \left[\frac{p}{p - \varphi p_{\text{вп max}}} \left(1 + \varphi \frac{\rho_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 U'^2_{\Delta p} + \left(1 + \varphi \frac{\rho_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 U'^2_{\Delta T} \right] \right\}^{0,5}, \quad (43)$$

де U'_{τ} – відносна розширена невизначеність інтервалу часу, упродовж якого розраховується кількість газу; $U'_{\Delta p}$, $U'_{\Delta p}$, $U'_{\Delta T}$ – відносна розширена невизначеність, зумовлена дискретизацією аналогового сигналу відповідно Δp , p і T в часі τ .

Під час вимірювання кількості сухої частини вологого газу за допомогою вимірювального комплексу відносна розширена невизначеність результату вимірювання кількості цього середовища розраховуватиметься за рівняннями:

– якщо задана абсолютна вологість f газу

$$U'_{V_{\text{сг}}} = \left\{ U'^2_{q_{\text{сг,овк}}} + U'^2_{\tau} + \frac{1}{4} \left[U'^2_{\Delta p} + \left[\frac{1}{1 - \frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \frac{p_{\text{вп max}}}{p}} \left(1 + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 U'^2_{\Delta p} + \left(1 + \frac{f}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 U'^2_{\Delta T} \right] \right\}^{0,5} \quad ;(44)$$

– якщо задана відносна вологість φ газу

$$U'_{V_{\text{сг}}} = \left\{ U'^2_{q_{\text{сг,овк}}} + U'^2_{\tau} + \frac{1}{4} \left[U'^2_{\Delta p} + \left[\frac{p}{p - \varphi p_{\text{вп max}}} \left(1 + \varphi \frac{\rho_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right) \right]^2 U'^2_{\Delta p} + \left(1 + \varphi \frac{\rho_{\text{вп max}}}{\rho_{\text{вг}}} \right)^2 U'^2_{\Delta T} \right] \right\}^{0,5}. \quad (45)$$

Висновки. Отримані нові математичні моделі (33)–(38) відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати сухої частини вологого газу, приведені до стандартних умов, і математичні моделі (40)–(45) відносної розширеної невизначеності результату обчислення кількості сухої частини вологого газу, приведені до стандартних умов, для різних конфігурацій витратомірів змінного перепаду тиску. Ці математичні моделі, які не порушують вимоги Національних стандартів України [1–5] і закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [9], уможливають підвищити точність вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу, приведених до стандартних умов, а також і енерговміст газу.

1. ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 (ГОСТ 8.586.1–2005, IDT; ISO5167-1:2003, NEQ). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 1: Принцип методу вимірювання та загальні положення. 2. ДСТУ ГОСТ

8.586.2:2009 (ГОСТ 8.586.2–2005, IDT; ISO5167-2:2003, NEQ). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 2: Діафрагми. Технічні вимоги. 3. ДСТУ ГОСТ 8.586.3:2009 (ГОСТ 8.586.3–2005, IDT; ISO5167-3:2003, NEQ). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 3: Сопла і сопла Вентурі. Технічні вимоги. 4. ДСТУ ГОСТ 8.586.4:2009 (ГОСТ 8.586.4–2005, IDT; ISO5167-4:2003, NEQ). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 4: Труби Вентурі. Технічні вимоги. 5. ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 (ГОСТ 8.586.5–2005, IDT). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. – Ч. 5: Методика виконання вимірювань. 6. РД 50-213–80 Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1982. 7. Пістун Є.П., Лесовой Л.В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. – Львів: Видавництво ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносії», 2006. – 576 с. 8. ГОСТ 8.563.2-97 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Методика выполнения измерений с помощью сужающих устройств. 9. Закон України "Про метрологію та метрологічну діяльність". – 1998.

УДК 681.515.001.41(0.75.8)

І.М. Ковела, О.С. Вітер, Ю.В. Яцук
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра комп'ютеризованих систем автоматики

ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ З ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

© Ковела І.М., Вітер О.С., Яцук Ю.В., 2010

Запропоновано створені у середовищі Simulink моделі неперервних та цифрових систем з широтно-імпульсним керуванням електромоторними виконавчими механізмами постійної швидкості як приводами пропорційної дії, призначені для дослідження автоматичних систем регулювання промислових об'єктів.

Designed environment created in Simulink models of continuous and digital systems with pulse-width control with actuator constant speed drives as the proportional action to study the automatic control system of industrial facilities.

Постановка проблеми. У практиці автоматизації промислових об'єктів завдяки багатьом перевагам широко застосовуються системи з цифровими регуляторами та електромоторними виконавчими механізмами (ВМ) постійної швидкості [1–4]. Як відомо, такі ВМ разом з пусковим пристроєм мають істотно нелінійну статичну характеристику (як у трипозиційного реле з гістерезисом), однак її можна лінеаризувати за допомогою широтно-імпульсного керування так, що система загалом може наближено розглядатися як лінійна. Під час дослідження такого класу систем ще на стадії проектування виникає необхідність їх моделювання, яке найдоцільніше виконати за допомогою засобів *Simulink* (Matlab 7.7. (R2008b)) [5, 6]. При цьому потрібно реалізувати також моделі підсистем широтно-імпульсного керування виконавчими механізмами як приводами пропорційної або інтегральної дії. Водночас у доступних джерелах моделей такого призначення не виявлено.

Формулювання цілі статті. Математичні моделі підсистем широтно-імпульсного керування електромоторними виконавчими механізмами постійної швидкості як приводами пропорційної або