

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ

УДК 621.317.39

Г. Юрчик

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій

МЕТОД ПЕРІОДИЧНОГО АВТОКАЛІБРУВАННЯ ВИТРАТОМІРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

© Юрчик Г., 2015

Запропоновано метод періодичного автокалібрування витратомірів змінного перепаду тиску безпосередньо в умовах їх експлуатації, які поширено в різних галузях промисловості для контролю та обліку витрати різних рідинних речовин (нафтопродукти, гаряча вода, харчові продукти тощо). В основу методу покладено використання структурно-часової надлишковості вимірювальних перетворень, що дає можливість алгоритмічним шляхом визначити і врахувати поправку на прогресуючі похибки витратоміра як адитивного, так і мультиплікативного характеру. В результаті підвищується метрологічна надійність витратомірів у процесі їх тривалої експлуатації і, відповідно, достовірність технологічного контролю об’ємної витрати рідинних речовин.

Ключові слова: витратомір змінного перепаду тиску, функція вимірювального перетворення, адитивна і мультиплікативна похибки, калібрований вплив на звужувальний пристрій, лінійна апроксимація, алгоритм функціонування витратоміра, точність методу автокалібрування.

The method of periodic auto-calibration device for flow measurement pressure drop directly in terms of their operation, which are widely used in various industrial sectors for the control and accounting costs of various liquid substances (oil, hot water, food, etc.). The basis of the method is based on the use of structural and temporal redundancy measurement conversions, enabling algorithmic way to identify and consider an amendment to the progressive flow errors as additive and multiplicative nature. As a result of increased flow metrological reliability in the process of continuous operation and, therefore, the reliability of process control volumetric flow of liquid substances.

Key words: ASCD differential pressure measuring conversion function, and cartoon additive error calibrated impact on zvuzhuvalnyy device, linear approximation, algorithm of flow, precision auto-calibration method.

Вступ

Підвищення якості продукції і ефективності виробництва нерозривно пов’язане з розробленням та застосуванням досконаліших точних методів та засобів вимірювання, призначених для контролю, регулювання і управління технологічними процесами (ТП) в різних галузях промисловості України.

На багатьох вітчизняних підприємствах використовуються ТП, пов’язані з транспортуванням трубопроводами різних рідинних речовин – таких, як нафтопродукти, енергоносії (гаряча вода, пара, природний газ тощо), харчові продукти (спирт, мінеральна вода, соки, молоко тощо) та інші. Для контролю, регулювання, управління цими ТП та обліку речовин, що транспортуються, широко використовуються витратоміри змінного перепаду тиску, за допомогою яких здійснюється вимірювання і контроль одного з визначальних параметрів ТП – об’ємної витрати рідинної речовини Q_x , тобто кількості речовини, що проходить через переріз трубопровода в одиницю часу

або за певний проміжок часу. На практиці використовують також тахометричні, електромагнітні, ротаметричні витратоміри, але значною перевагою витратомірів змінного перепаду тиску є їх висока надійність, працездатність у важких виробничих умовах, відносна простота та компактність вимірювальних приладів. Основним недоліком даних витратомірів є їх недостатня точність. Похибка вимірювання може досягати $\pm (5 \div 10)\%$, яка сьогодні не задовольняє вимог сучасних ТП.

Як відомо, у склад витратоміра змінного перепаду тиску входить первинний перетворювач (ПП) об'ємної витрати у вигляді пристрою (діафрагми) звуження потоку контрольованої рідинної речовини в трубопроводі, а також диференціальний манометр із з'єднувальними (імпульсними) трубками для визначення перепаду тиску на вході – виході звужувального пристрою, залежність якого від значення об'ємної витрати речовини представляється відомим співвідношенням [1].

$$Q_x = 0.01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot m \cdot D^2 \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_1 - P_2)}, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт витрати речовини, залежний від числа Рейнольдса Re в ламінарній області і не залежний в турбулентній; ε – коефіцієнт розширення рідини внаслідок проходження її через звужувальний пристрій; $m = d^2/D^2$ – модуль звужувального пристрою; d – діаметр отвору звужувального пристрою при певній температурі контрольованої рідини; D – внутрішній діаметр трубопроводу; ρ – густина рідини у перерізі перед входом в отвір звужувального пристрою; $\Delta P = P_1 - P_2$ – перепад тиску у звужувальному пристрої.

Існуюча процедура експериментального градуювання витратомірів доволі складна і займає багато часу. Градувальні характеристики (ГХ) даних витратомірів визначають аналітично розрахунком за спеціальними Правилами – стандартами [2], які вимагають суворо дотримуватися методики виконання вимірювань [3], а також методики монтажу та експлуатації звужувальних пристроїв. Якщо вимірювання витрати здійснюється в умовах, при яких параметри контрольованої речовини відрізняються від параметрів, прийнятих для розрахунку звужувального пристрою, то з'являється відповідно додаткова похибка. Неправильний монтаж або неконтрольовані зміни геометричних параметрів звужувальних пристроїв в процесі їх експлуатації зумовлюють появу неприпустимо великих прогресуючих похибок як адитивного, так і мультиплікативного характерів. Поступова зміна діаметра та кута заточки отвору звужувального пристрою може відбуватися з багатьох причин, і переважно за дії хімічної агресивності контрольованої речовини та наявності в ній твердих механічних домішок. Тому визначити і компенсувати вищезазначені похибки в процесі неперервної експлуатації витратоміра без демонтажу і заміни звужувального пристрою, або його переградування, практично неможливо. Суттєві похибки вимірювання витрати можуть бути зумовлені також поступовим дрейфом ГХ диференціального манометра і дією на витратомір різних дестабілізуючих впливових факторів. До того ж доволі нелінійна функціональна залежність контрольованої витрати речовини від перепаду тиску у звужувальному пристрої у вигляді $Q_x = f(k\sqrt{\Delta P})$ суттєво обмежує точність відомих методів досягнення інваріантності витратомірів щодо розглянутих дестабілізуючих впливових факторів через достатньо значну похибку лінійної апроксимації згаданої вище функції вимірювального перетворення [4, 5].

У статті пропонується до розгляду структурно-алгоритмічний метод періодичного автокалібрування витратомірів змінного перепаду тиску безпосередньо в умовах експлуатації і в процесі тривалого часу їх функціонування без громіздкої і неефективної операції демонтажу звужувального пристрою, що дає можливість підвищити метрологічну надійність витратомірів, і забезпечити при цьому нормовану достовірність контролю об'ємної витрати різних рідинних речовин.

Метод автокалібрування витратомірів змінного перепаду тиску в умовах їх експлуатації

Метод автокалібрування заснований на застосуванні структурно-часової надлишковості вимірювальних перетворень, введенні у схему витратоміра пристроїв формування каліброваних адитивного і мультиплікаційного тестів, які діють безпосередньо на звужувальний пристрій в місці його установки на технологічному обладнанні. На рисунку наведено структурну схему

мікропроцесорного витратоміра змінного перепаду тиску із структурною надлишковістю, за допомогою якої реалізується запропонований метод. Алгоритм функціонування витратоміра забезпечує одержання основного і додаткових результатів вимірювання, за допомогою яких значення контрольованої об'ємної витрати рідинної речовини визначається по формулі з автокорекцією домінуючих прогресуючих похибок.

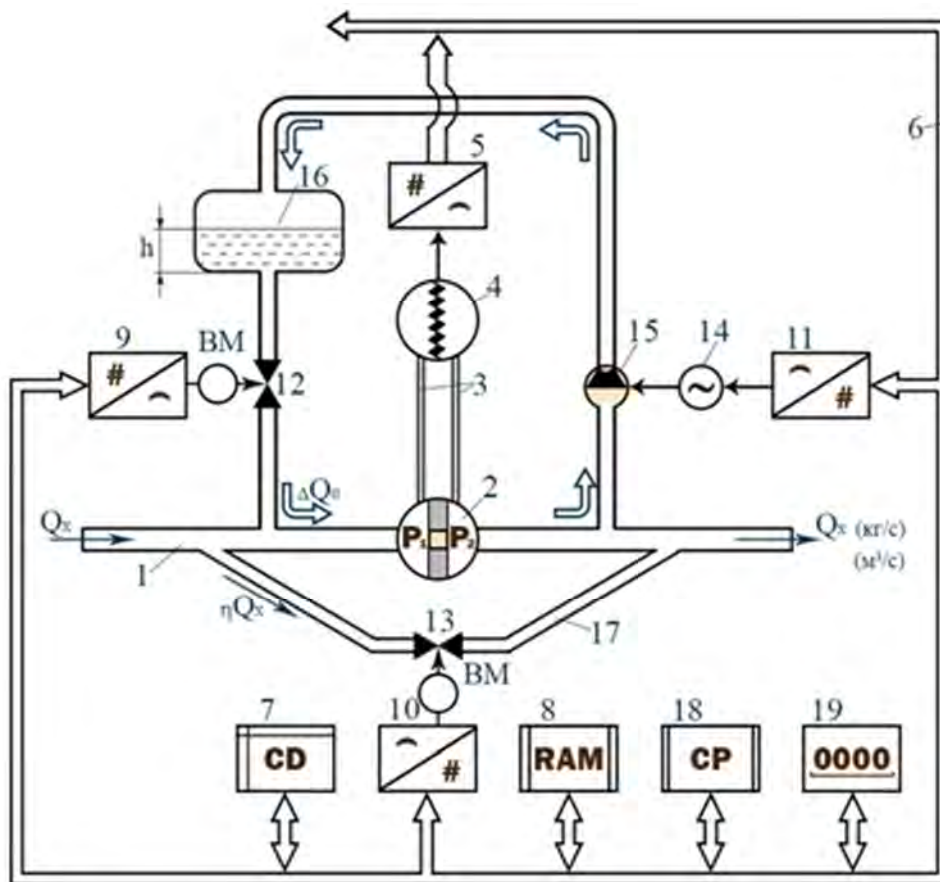
Суть методу, що пропонується, полягає в наступному. Виходячи з рівняння вимірювального перетворення (1), перепад тиску на звужувальному пристрої 2 дорівнює

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho}{(0.01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot m \cdot D^2)^2} \quad (2)$$

або

$$\Delta P = K_1 Q_x^2, \quad (3)$$

де $\rho = \frac{\rho}{(0.01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot m \cdot D^2)^2}$ – коефіцієнт перетворення (чутливості) звужувального пристрою 2.



Структурна схема мікропроцесорного витратоміра змінного перепаду тиску з автокорекцією прогресуючих похибок:

- 1 – трубопровід з потоком контрольованої речовини; 2 – звужувальний пристрій;
 3 – імпульсні трубки; 4 – диференціальний манометр; 5 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП);
 6 – загальна шина персонального комп'ютера; 7 – блок управління; 8 – блок оперативної пам'яті;
 9, 10, 11 – цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) з виконавчими механізмами (ВМ); 12, 13 – автоматичні запірні клапани; 14 – електродвигун відцентрового насоса 15; 16 – напірно-накопичувальна ємність із стабілізованим рівнем h рідинної речовини; 17 – байпас, призначений для шунтування звужувального пристрою 2 і зменшення контрольованого потоку рідини через останній в $\eta=0$, $8=0$, 9 раз;
 18 – обчислювальний пристрій; 19 – цифровий індикатор контрольованої об'ємної витрати рідинної речовини

Відповідний вихідний сигнал U диференціального манометра 4 визначається виразом

$$U = K_1 K_2 Q_x^2, \quad (4)$$

де K_2 – коефіцієнт перетворення диференціального манометра 4.

З врахуванням виразів (2) і (4) рівняння вимірювального перетворення витратоміра представиться у вигляді

$$N = S Q_x^2 K_3, \quad (5)$$

де N – цифровий код вихідного сигналу диференціального манометра 4; K_3 – стабільний коефіцієнт перетворення АЦП 5.

Під час монтажу та налагодження витратоміра на технологічному об'єкті перед початком тривалої експлуатації здійснюється його первинне калібрування при відомому значенні об'ємної витрати рідинної речовини Q_k , яке визначається за формулою:

$$Q_k = \frac{Q_{\min} + Q_{\max}}{2}, \quad (6)$$

де Q_{\min} і Q_{\max} – відповідно нижня і верхня границі діапазону вимірювання об'ємної витрати рідинної речовини.

На початку процедури первинного калібрування витратоміра, керовані запірні клапани 12, 13 закриті і контрольований потік рідинної речовини Q_k у повному об'ємі проходить через звужувальний пристрій 2.

З врахуванням функції перетворення витратоміра (5), цифровий код вихідного сигналу диференційного манометра набудатиме значення :

$$N'_1 = S Q_k^2 K_3. \quad (7)$$

Одержаний код N'_1 запам'ятовують та зберігають у блоці оперативної пам'яті 8.

Потім змінюють чутливість звужувального пристрою в $\eta=0.8\div 0.9$ раз відкриттям запірного клапану 13 шунтуючого байпаса 17. Цю операцію виконують за командою блоку управління 7 за допомогою цифро-аналогового перетворювача 10 та виконавчого механізму. В результаті вихідний сигнал дифманометра зміниться, і його цифровий код набуде значення:

$$N'_2 = \eta S Q_k^2 K_3, \quad (8)$$

де $\eta=0.8\div 0.9$ – коефіцієнт шунтування потоку рідинної речовини через звужувальний пристрій 2. Одержаний цифровий код N'_2 також запам'ятовується, після чого клапан 13 закривають, і на цьому первинне калібрування витратоміра закінчується.

У процесі подальшої експлуатації витратоміра відбувається поступовий дрейф його ГХ внаслідок дії на нього вищезгаданих впливових факторів, що зумовлює появу прогресуючих та додаткових похибок. У результаті виникає необхідність в автокалібруванні витратоміра, яке здійснюється автоматично за програмою за таким алгоритмом.

Вимірюють об'ємну витрату Q_x контрольованої рідинної речовини при закритих клапанах 12, 13 пристроїв формування адитивного і мультиплікативного тестів на звужувальний пристрій 2. Цифровий код сигналу дифманометра 4 матиме значення:

$$\begin{aligned} N''_1 &= [S_1(1 + \gamma_1)Q_x^2 + \Delta U_1]K_3 = K_3 S_1 Q_x^2 + K_3 S_1 \gamma_1 Q_x^2 + K_3 \Delta U_1 = \\ &= K_3 S_1 Q_x^2 + \Delta N_1 + \Delta N_2, \end{aligned} \quad (9)$$

де $\gamma = \Delta S / S$; ΔS – абсолютна похибка чутливості витратоміра або коефіцієнта перетворення S ; $\Delta N_1 = K_3 S_1 \gamma_1 Q_x^2$ – мультиплікативна похибка вимірювання в цифровому коді, зумовлена, по-перше, зміною чутливості звужувального пристрою через неконтрольовані відхилення його геометричних параметрів від їх розрахункових початкових значень, а також внаслідок можливої зміни параметрів самої рідинної речовини, що входять у співвідношення (1), і, по-друге, внаслідок можливої зміни чутливості диференціального манометра 4; $\Delta N_2 = K_3 \Delta U_1$ – адитивна похибка вимірювання у цифровому коді, зумовлена дрейфом нуля витратоміра, тобто зміщенням його ГХ.

Цифровий код N_1'' реєструють і запам'ятовують. Відповідно до виразу (9) значення контрольованої об'ємної витратної рідинної речовини можна визначити за формулою:

$$Q_x = \sqrt{\frac{N_1'' - \Delta N_1 - \Delta N_2}{K_3 S_1}}. \quad (10)$$

Якщо у вираз (10) ввести компенсальні поправки на похибки ΔN_1 і ΔN_2 , то можна одержати значення витрати Q_x , яке буде максимально наближене до реального її значення. Визначають ці поправки за допомогою додаткових результатів вимірювання каліброваних тестів на звужувальний пристрій 2.

Для цього з блоку управління 7 надходить команда на ЦАП 9 з виконавчим механізмом, який відкриває запірний клапан 12 і до контрольованого потоку Q_x на вході звужувального пристрою додається однорідний з контрольованою рідиною калібрований потік ΔQ_0 з напірно-накопичувальної ємності 16. При цьому значення величини ΔQ_0 має обиратися в межах 5÷10 порогів чутливості витратоміра, формується з похибкою $\pm(2.0\div 3.0)\%$ і попередньо визначається за формулою:

$$\Delta Q_0 = \frac{(Q_x + \Delta Q_0) - Q_x}{\Delta t}, \quad (11)$$

де $(Q_x + \Delta Q_0)$ і Q_x – відповідно об'ємна витрата рідинної речовини, що проходить через звужувальний пристрій 2 витратоміра з каліброваним потоком ΔQ_0 та без нього за однакові проміжки часу Δt .

У результаті вихідний сигнал дифманометра зміниться, а його цифровий код матиме значення:

$$N_2'' = [S_2(1 + \gamma_2)(Q_x + \Delta Q_0)^2 + \Delta U_2]K_3. \quad (12)$$

Цифровий код N_2'' реєструють та запам'ятовують, після чого за допомогою ЦАП 10 та виконавчого механізму відкривають запірний клапан 13 байпасу 17, що зумовлює зменшення сумарного потоку рідини через звужувальний пристрій в $\eta=0.8\div 0.9$ раз. Вимірюють нове усталене значення об'ємної витрати рідинної речовини. Цифровий код вихідного сигналу дифманометра 4 матиме значення:

$$N_3'' = [S_3(1 + \gamma_3)\eta(Q_x + \Delta Q_0)^2 + \Delta U_3]K_3, \quad (13)$$

де η – коефіцієнт шунтування потоку рідини у звужувальному пристрої 2.

Цифровий код N_3'' реєструється і запам'ятовується. Далі за командою блоку управління 7 клапаном 12 перекривають калібрований потік рідини ΔQ_0 , завдяки чому вихідний сигнал дифманометра змінюється, а його цифровий код дорівнюватиме:

$$N_4'' = [S_4(1 + \gamma_4)\eta Q_x^2 + \Delta U_4]K_3. \quad (14)$$

Цифровий код N_4'' реєструється та запам'ятовується, після чого закривають клапан 13 і витратомір переводять у початковий стан поточних вимірювань об'ємної витрати речовини.

Враховуючи те, що при здійсненні протягом короткого інтервалу часу (15÷20 с) каліброваних тестів на звужувальний пристрій 2 збільшення та зменшення контрольованої витрати відбувається в межах практично лінійної ділянки функції вимірювального перетворення витратоміра (4) і в околі робочої точки Q_x^2 , то можна вважати незмінними в одержаних рівноточних результатах вимірювання (9, 12, 13, 14) значень чутливостей $S_1=S_2=S_3=S_4=S$ та похибок $\gamma_1=\gamma_2=\gamma_3=\gamma_4=\gamma$; $\Delta U_1=\Delta U_2=\Delta U_3=\Delta U_4=\Delta U$.

Потім за допомогою одержаних додаткових результатів спостережень і результатів первинного калібрування (7), (8) витратоміра визначають значення поправок на прогресуючі адитивну і мультиплікативну похибки вимірювання об'ємної витрати рідинної речовини відповідно за формулами:

$$\Delta N_1 = N_1'' - \frac{(N_1'' - N_4'')(N_2'' - N_1'')}{(N_2'' - N_3'') - (N_1'' - N_4'')} ; \quad (15)$$

$$\Delta N_2 = \frac{(N_1'' - N_4'')}{(N_1' - N_2')} - \frac{Q_x^2}{Q_k^2} N_1'' \quad (16)$$

Якщо тепер ввести у вираз (10) одержані компенсувальні поправки з протилежними знаками, то значення контрольованої витрати рідинної речовини, максимально наближене до її реального значення, визначатиметься за формулою:

$$Q_x = Q_k \sqrt{\frac{N_1''}{N_1'} - \frac{1}{2} \left[\frac{N_1'' - N_4''}{N_1' - N_2'} - \frac{(N_1'' - N_4'')(N_2'' - N_1'')}{N_1''(N_2'' - N_3'' - N_1'' + N_4'')} \right]} \quad (17)$$

Висновки

З виразу (17) видно, що обчислене значення контрольованої об'ємної витрати рідинної речовини не залежить від нелінійності та дрейфу ГХ витратоміра, дії на нього різних дестабілізуювальних факторів і визначається лише цифровими кодами додаткових результатів рівноточних вимірювальних перетворень. Використання функції вимірювального перетворення витрати у вигляді $\Delta P = K_1 Q_x^2$, замість традиційної функції $Q_x = k\sqrt{\Delta P}$, дає змогу повністю усунути похибку лінійної апроксимації витратоміра в околі робочої точки Q_x^2 . Точність запропонованого методу калібрування витратомірів змінного перепаду тиску залежить переважно від стабільності каліброваних тестів на звужувальний пристрій витратоміра протягом короткого часу їх здійснення та похибкою каліброваної об'ємної витрати Q_k , яка може бути забезпечена на рівні $\pm(0.25 \div 0.5)\%$. Як показують результати проведених розрахунків, похибка розглянутого методу автокалібрування витратоміра для заданого робочого діапазону вимірювання знаходиться в межах $\pm 1.0\%$.

Значення компенсувальної поправки Δi до поточних результатів вимірювання об'ємної витрати рідинної речовини визначається різницею $\Delta i = Q_x - Q_{xi}$, де Q_x – значення витрати, одержане за формулою (17) під час чергового автокалібрування витратоміра; Q_{xi} – поточний результат прямого вимірювання об'ємної витрати до моменту калібрування витратоміра.

Можливість здійснення в реальному часі з необхідною періодичністю автокалібрування витратомірів безпосередньо в умовах їх експлуатації дає можливість уникнути непередбачуваних значних втрат різних рідинних речовин, що транспортуються трубопроводами, забезпечити їх точний облік та досягти балансу цих речовин на вході-виході магістральних трубопроводів, а також підвищити економічну ефективність різних ТП, в яких підвищення достовірності контролю витрати рідинних речовин забезпечує високу якість виготовленої продукції.

1. Преображенский В. П. *Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов* / В. П. Преображенский. – М: Энергия, 1978. – 703с. 2. ДСТУ ГОСТ 8.586.1, 2, 3, 4, 5 – 2007 “Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв”. 3. ДСТУ ГОСТ 8.586.5 – 2007. *Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 5. Методика выполнения измерений*. 4. Юрчик Г. В. *Метод забезпечення інваріантності вимірювального перетворення витратоміра змінного перепаду тиску* / Г. В. Юрчик, Ю. О. Скрипник, В. І. Водотовка // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2002. – №4. – С. 113–115. 5. А. с. 1682795 ССРСР, МКІ G01F1/ 34. *Способ измерения расхода и устройство для его осуществления*/ Ю. А. Скрипник, Г. В. Юрчик, В. И. Водотовка (ССРСР). – № 4685207; заявл. 09.02.89; опубл. 07.10.91. Бюл. № 37.