

Висновки

Враховуючи результати досліджень, можна стверджувати, що розроблений показниково-степеневий ЧФП може ефективно використовуватись в автоматизованих системах як пристрій, що відтворює послідовно в часі розгортку показниково-степеневі функції. Необхідно лише попередньо визначити початкове значення числа в реєстрі базового елемента пристрою – число-імпульсного помножувача, який охоплений додатним зворотним зв'язком і тому істотно впливає на точність перетворення.

Ще одним застосуванням розробленого показниково-степеневого ЧФП є використання в криптосистемах як криптографічного процесора, що моделює різноманітні односторонні функції, які містять показниково-степеневу функцію, а також в пристроях, що здійснюють поблочний пошук методом послідовного перебору відповідного до зашифрованого тексту.

1. Дудикевич В.Б. Синтез функціональних число-імпульсних перетворювачів кодів // Вісн. ЛПІ. 1991. – № 257. – С. 43 – 46. 2. Лагун А.Е. Автоматизований структурний синтез число-імпульсних функціональних перетворювачів кодів // Вісн. ДУ “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – 1999. – № 366. – С. 139 – 144. 3. Лагун А.Е. Автоматизований структурний синтез число-імпульсних функціональних перетворювачів: Автореф. дис. ... канд техн. наук. – Львів, 2001. 4. Дудикевич В., Лагун А. Особливості автоматизованого структурного синтезу показникових та степеневих число-імпульсних функціональних перетворювачів: Мат. Міжнародної наук.-техн. конф. «Автоматика–2000». – Львів, 2000. – С. 153 – 157.

УДК 681.12

І. Демідов, В. Поджаренко

Вінницький державний технічний університет
кафедра метрології та промислової автоматики

ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ВОДИ БАГАТОКАНАЛЬНИМИ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ ВИТРАТОМІРАМИ

© Демідов І., Поджаренко В., 2003

The influence of the main factors on the error of measurements of water flow by ultrasonic multichannel flowmeter is considered.

Останнім часом широкого розповсюдження набули ультразвукові витратоміри та лічильники. В більшості з них використовується один акустичний канал, який складається з “точкових” випромінювача та приймача ультразвукових хвиль, які розташовуються на діаметрально протилежних ділянках труби, по якій проходить контрольований потік рідини, і зміщені один відносно другого у напрямку потоку. Такі ультразвукові витратоміри не дають змоги враховувати розподіл швидкостей в поперечному перетині потоку рідини, внаслідок чого вони мають відповідні додаткові похибки вимірювання.

Ця проблема розглянута в [1, 2]. В [1] розглядається можливість наближеного врахування гідродинамічного коефіцієнта, який являє собою відношення швидкості рідини, усередненої по акустичному каналу, до швидкості рідини, усередненої по поперечному перетину труби. Авторами [2] запропонований новий ультразвуковий витратомір, що не має

зазначеного недоліку, в якому застосовані кільцеві випромінювач та приймач ультразвукових коливань, вбудовані в трубу і рознесені по її довжині.

Ми пропонуємо для підвищення точності вимірювання витрат рідин ультразвуковими методами використати додаткові акустичні канали, що уможливить врахувати розподіл швидкостей в поперечному перетині потоку рідини. Метою цієї роботи є визначення залежності між кількістю акустичних каналів і похибкою витратоміра та оцінка доцільності використання багатоканальних ультразвукових витратомірів.

Вимірювання витрати багатоканальним витратоміром виконується методом посередніх вимірювань значень питомих витрат по декількох перетинах водного потоку з подальшим обчисленням витрат [3, 4].

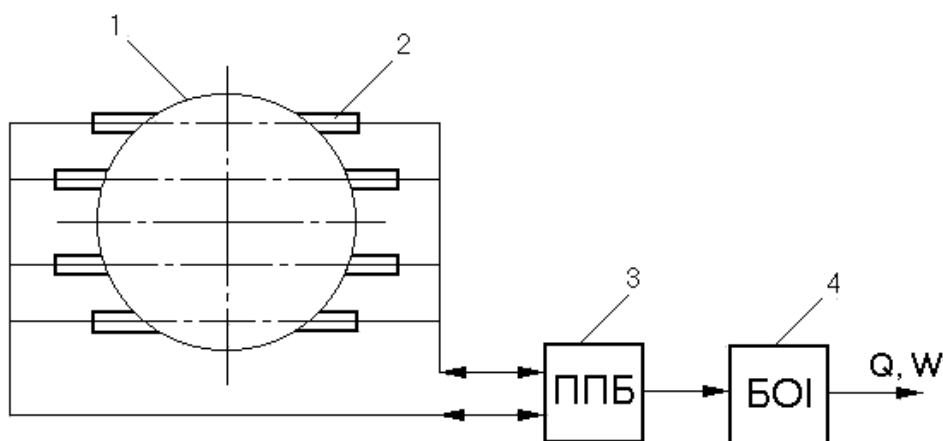


Рис. 1. Структурна схема багатоканального ультразвукового витратоміра

До складу багатоканальних ультразвукових витратомірів (рис. 1) входять вимірвальна ділянка 1, на якій встановлено акустичні перетворювачі 2, і задані координати по перетину трубопроводу та пов'язані з приймально-передаючим блоком 3, блок обробки інформації 4, в якому реалізується алгоритм обчислення витрати.

Розглянемо загальний підхід вимірювання витрати багатоканальним ультразвуковим витратоміром.

Витрата води в декартовій системі координат виражається таким рівнянням:

$$Q = \int_{X_1}^{X_2} \cos(\bar{n}_1; \bar{V}) dx \int_{\varphi_1(y)}^{\varphi_2(y)} V(x; y) \cos(\bar{n}_2; \bar{V}) dy, \quad (1)$$

де x_1, x_2 – координати інтегрування по діаметру трубопроводу D ;

$\varphi_1(y), \varphi_2(y)$ – межі інтегрування при фіксованому значенні параметра y ;

\bar{V} – швидкість;

\bar{n}_1, \bar{n}_2 – нормалі до перетину, по якому проводиться інтегрування.

Виходячи з рівняння (1), в циліндричному трубопроводі витрата рідини Q чисельно дорівнює об'єму фігури, яка обмежена поверхнею функції розподілу швидкостей відносно стінок та площею перетину трубопроводу.

Інтеграл (1) розпадається на два інтеграли – внутрішній та зовнішній. Принциповою особливістю багатоканального витратоміра є те, що внутрішній інтеграл, який чисельно дорівнює питомій витраті, вимірюється при декількох фіксованих значеннях x , а зовнішній інтеграл обчислюється методами чисельного інтегрування, наприклад, методом Чебишева, Гаусса.

Отже, кожний акустичний канал витратоміра градується в одиницях м²/с питомої витрати, а значення витрати та похибка вимірювання витрати обчислюється згідно з методикою виконання вимірювань. Градування акустичних каналів виконують на спеціальному стенді імітаційними методами [4].

Виходячи з рівняння (1), для 4 каналного витратоміра з частотно-імпульсним перетворенням (рис.1), отримано основне рівняння, яке реалізується в блоці обробки інформації:

$$Q = K_J \sum_{i=1}^4 H_i \eta_i \gamma_i, \quad (2)$$

де Q – витрата;

K_J – поправковий коефіцієнт для застосованої формули чисельного інтегрування;

H_i – параметр, який залежить від апаратури, що застосовується;

η_i – параметр, який залежить від вимірювальної ділянки;

γ_i – поправковий коефіцієнт, що залежить від точності встановлення акустичних перетворювачів на вимірювальній ділянці.

Параметри H_i і η_i визначаються відповідно до рівнянь:

$$H_i = \frac{K_i N_i}{2 K_M T_B}; \quad \eta_i = \frac{D \cdot L_i^2 \cdot \text{tg} \theta_i}{4}, \quad (3)$$

де K_i – коефіцієнт перетворення, визначається імітаційним методом [4];

N_i – різниця кількості імпульсів;

T_B – час вимірювання;

K_M – коефіцієнт множення;

D – діаметр вимірюваної ланки;

L_i – базова відстань;

θ_i – кут встановлення акустичних перетворювачів.

З врахуванням підходу до вимірювання витрати багатоканальним витратоміром як посередніх вимірювань отримано рівняння для оцінки похибки вимірювання витрати:

$$\delta_Q = 1,1 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 H_i^2 \eta_i^2 \gamma_i^2 (\delta_{H_i}^2 + \delta_{\eta_i}^2 + \delta_{\gamma_i}^2)}{\sum_{i=1}^4 H_i \eta_i \gamma_i} + \delta_J^2}, \quad (4)$$

де δ_{H_i} , δ_{η_i} , δ_{γ_i} – похибки вимірювання параметрів H_i , η_i , γ_i ,

δ_J – похибка чисельного інтегрування.

Однією із складових похибки вимірювання витрати багатоканальним ультразвуковим витратоміром є методична похибка чисельного інтегрування δ_J , причому для симетричних потоків ця складова визначена в [3]. На практиці, особливо для трубопроводів великого діаметра, неможливо створити умови, які б забезпечували симетричність епюри швидкостей. В кращому випадку витратомір можна встановити з підхідною ланкою від 5 до 15 діаметрів трубопроводу, тобто його робота в реальних умовах відбуватиметься на спотвореному водному потоці.

Як основа для дослідження методичної похибки чисельного інтегрування прийняті моделі спотворених потоків професора Салямі, розроблені для національного метрологічного центру Великобританії [5]. В полярній системі координат спотворені моделі потоку вводяться у вигляді рівняння

$$U(R, \theta) = (1 - R)^{1/n} + mR(1 - R)^{1/K} \cdot f(\theta), \quad (5)$$

де U – безрозмірна швидкість потоку;

R – радіус;

θ – кут повороту лінії інтегрування по радіусу;

$n, K, m, f(\theta)$ – параметри, за допомогою яких задаються різні моделі витрати.

Як об'єкт дослідження було вибрано сім моделей витрати (P6; P8; P9; P10; P12; P16; P17) спотвореного потоку, показані на рис. 2, які у зіставленні з експериментальним результатом якнайповніше характеризують потік після відведення трубопроводу, засувки, трійника тощо.

Рівняння моделей витрати такі:

$$P6 \quad - \quad U(R, \theta) = (1 - R)^{1/9} + \frac{0,5}{\pi} R \cdot (1 - R)^{1/4} \cdot \sin(\theta)$$

$$P8 \quad - \quad U(R, \theta) = (1 - R)^{1/9} + \frac{0,04}{\pi} (1 - R)^{1/4} \cdot (\theta^2 - 1) \cdot (1 - \cos \theta)^2$$

$$P9 \quad - \quad U(R, \theta) = (1 - R)^{1/9} + \frac{2}{\pi^5} (1 - R)^{1/4} \cdot R \cdot \theta^2 \cdot (2\pi - \theta)^2$$

$$P10 \quad - \quad U(R, \theta) = (1 - R)^{1/9} + \frac{2}{\pi^3} R \cdot (1 - R)^{1/4} \cdot (2\pi - \theta) \cdot \sin^2 \theta$$

$$P12 \quad - \quad U(R, \theta) = (1 - R)^{1/7} + R \cdot (1 - R)^{1/9} \cdot e^{(0,05\pi - 0,2\theta)} \sin \theta$$

$$P16 \quad - \quad U(R, \theta) = (1 - R)^{1/7} + 0,05\pi R \cdot (1 - R)^{1/9} \cdot e^{-0,2\theta} \sin^2 \theta$$

$$P17 \quad - \quad U(R, \theta) = (1 - R)^{1/7} - \frac{0,4}{\pi} R \cdot (1 - R)^{1/9} \cdot \theta \cdot \sin \theta$$

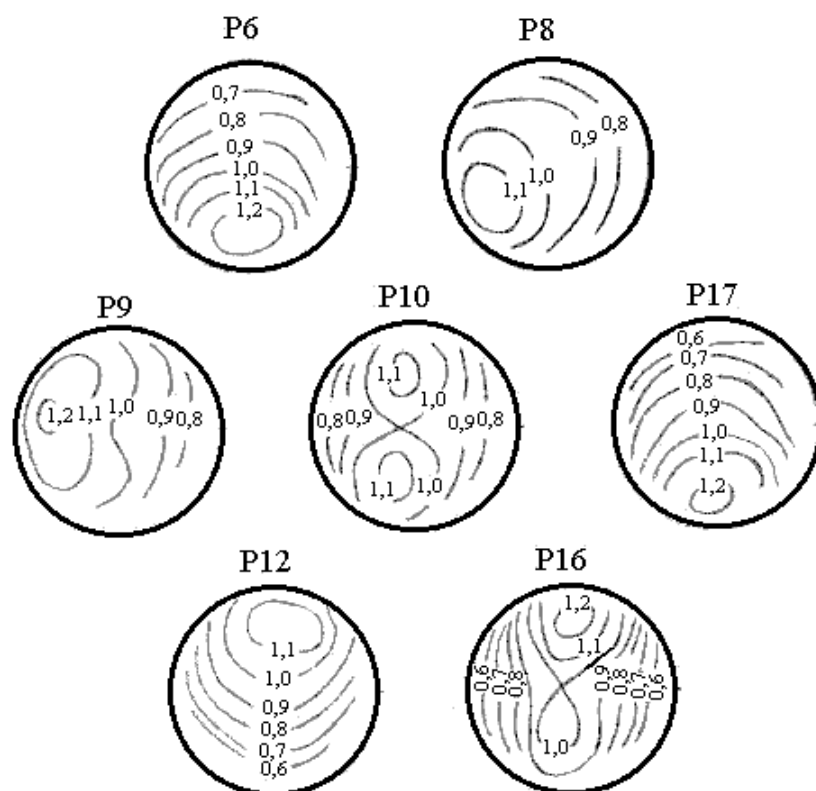


Рис. 2. Моделі спотвореного потоку

Методика дослідження похибок чисельного інтегрування полягала ось у чому. Дійсне значення витрати Q_0 обчислювалось за формулою

$$Q_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^1 U(R, Q) \cdot R dR dQ. \quad (6)$$

Значення Q_0 для моделей витрати спотвореного потоку такі:

P6 – 2,6786; P8 – 3,0908; P9 – 3,1454; P10 – 2,8179; P12 – 2,7862; P16 – 2,6417; P17 – 2,7849.

Витрата, що вимірюється багатоканальним витратоміром Q_M , визначається при числі акустичних каналів 2,3,4,5 методами Чебишева, Гаусса шляхом визначення в декартовій системі координат значень питомих витрат при фіксованому значенні x чисельними методами з похибкою не більше 0,001.

Похибка чисельного інтегрування визначається за формулою

$$\delta_J = \frac{Q_M - Q_0}{Q_0}. \quad (7)$$

Для підвищення точності вимірювання можна ввести поправкові коефіцієнти та визначити похибку введення поправки (таблиця).

Витрата, що вимірюється багатоканальним витратоміром Q_M

№	Метод Чебишева				Метод Гаусса			
	Δ_Q 10^{-2}	$\sigma_{\Delta Q}$ 10^{-2}	δ_J 10^{-2}	K_J	Δ_Q 10^{-2}	$\sigma_{\Delta Q}$ 10^{-2}	δ_J 10^{-2}	K_J
2	2,693	0,906	2,09	0,9731	2,693	0,906	2,09	0,9731
3	1,864	0,220	0,55	0,9815	1,047	0,402	0,985	0,9895
4	0,886	0,095	0,23	0,9911	0,358	0,169	0,42	0,9964
5	0,636	0,084	0,21	0,9936	0,193	0,137	0,335	0,9981

Так, для 4-канального витратоміра при використанні методу Чебишева необхідно вводити поправковий коефіцієнт $K_J = 0,991$ і похибка чисельного інтегрування дорівнюватиме $\delta_J = \pm 0,23$ % при довірчій імовірності $P=0,95$, а при використанні методу Гаусса – $K_J = 0,9964$, а $\delta_J = \pm 0,42$ % тощо.

На основі наведених розрахунків можна зробити такі висновки.

Порівняння двох методів розрахунку на моделях спотвореного потоку демонструє, що метод Чебишева дає завищений результат по абсолютному значенню, але середнє квадратичне відхилення результатів в 1,5 – 2 рази нижче порівняно з методом Гаусса для 3-4-5-канальних витратомірів. Для 2-канальних витратомірів ці результати однакові.

Кількість каналів для багатоканального ультразвукового витратоміра більше $N=4$ вибирати не потрібно, оскільки абсолютне значення витрати обчислюється більш точно, але середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань змінюється незначно. Так, для методу Чебишева ці зміни становлять 7 – 8 %, тобто точність підвищується на 0,07 – 0,08 %. При порівнянні 3-го 4-канальних витратомірів точність при збільшенні кількості каналів з трьох до чотирьох підвищується на 0,3 – 0,5 %, що вже достатньо істотно, а введення додаткового каналу у витратомір підвищує ціну на 20 – 25 %.

При зменшенні каналів до $N=2$ похибка підвищується на $\pm 1,5$ % порівняно з $N=3$ і на $\pm 1,8$ % – порівняно з $N=4$.

Розглянемо введення поправкового коефіцієнта γ_i в рівнянні (2), оскільки на трубопроводах великого діаметра врізання акустичних перетворювачів відбувається в реальний трубопровід. В результаті врізання виникає відхилення координати встановлення

акустичних перетворювачів від номінального значення в межах від 0,005 до 0,02 діаметра трубопроводу.

Значення поправкового коефіцієнта γ_i визначається за емпіричними формулами, отриманими шляхом моделювання відхилення координати встановлення акустичних перетворювачів на симетричному та спотвореному потоках при $N=4$.

Для крайніх каналів:

$$\gamma_{i+} = 1 - \frac{\Delta a^{(0,71-5,2\frac{\Delta a}{D})}}{D}; \quad \text{при } x_H - x > 0$$

$$\gamma_{i-} = 1 - \frac{\Delta a^{(1,08+1,5\frac{\Delta a}{D})}}{D}, \quad \text{при } x_H - x < 0$$
(8)

де x_H – номінальне значення координати за методом Чебишева;

Δa – відхилення координати від номінального значення.

Для центральних каналів:

$$\gamma_{i+} = 1 - \frac{\Delta a^{(1,08+4\frac{\Delta a}{D})}}{D} \quad \text{при } x_H - x > 0$$

$$\gamma_{i-} = 1 - \frac{\Delta a^{(1,08+1,5\frac{\Delta a}{D})}}{D} \quad \text{при } x_H - x < 0$$
(9)

При цьому відносна похибка δ_{γ_i} введення поправкового коефіцієнта дорівнює:

$$\delta_{\gamma_i} = \pm 0,28 \% \text{ при } \frac{\Delta a}{D} \leq 0,005;$$

$$\delta_{\gamma_i} = \pm 0,44 \% \text{ при } \frac{\Delta a}{D} \leq 0,01;$$

$$\delta_{\gamma_i} = \pm 0,53 \% \text{ при відхиленні одного каналу } \frac{\Delta a}{D} \leq 0,02, \text{ а інших } - \frac{\Delta a}{D} \leq 0,01.$$

Похибка вимірювання витрати знаходиться в межах від 1,3 до 1,6 %.

При введенні поправкових коефіцієнтів та випуску витратоміра разом з виміральною ланкою похибку вимірювання витрати можна довести до $\delta_{\theta}=0,5 - 0,8 \%$.

В тому випадку, коли існує можливість відградувати витратомір методом прямого зіставлення на перевірковій установці, похибка вимірювання витрати багатоканальним ультразвуковим витратоміром становитиме порядком $\delta_{\theta}=0,2 - 0,5 \%$ та визначатиметься передусім випадковою складовою похибки.

1. Народницький Г.Ю. О погрешности измерений расхода воды ультразвуковым накладным времяимпульсным расходомером. / Украинский метрологический журнал. – 2000. – № 3. 2. Ultraschallsensor für profilunabhängige Durchflussmessung: Jetzt geht's rund/Stange Gerd/Schweiz. Maschinenmarkt – 1995-96. – №46 – С. 59. 3. Сафин А.Г., Алмазов В.В., Антонов Н.Н., Решетников В.А. Влияние изменения структуры потока на методическую погрешность многоканальных ультразвуковых расходомеров. / Измерительная техника. – 1981. – №10. 4. Решетников В.А., Колодяжний Г.Н. Косвенный метод градуировки ультразвуковых расходомеров в мелиорации / Метрологическая служба в СССР. – 1985. – № 2. 5. L.A.Salami. Applikation of a compute to assymetric flow measurement in circular pipes. “Trans. Inst. M.C.” – 1984. – Vol.6. – № 4.