

УДК 681.121

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ РІДИНИ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ТИПУ

*Коробко І. В.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна*

*Розглянуті питання оптимального вибору значень конструктивних параметрів вимірювальних перетворювачів витрати рідини гідродинамічного типу з врахуванням конкретних умов їх застосування, шляхом визначення ефективності роботи таких приладів. Враховуючи те, що серед одних з основних вимог до вимірювальних перетворювачів витрати є мінімальна втрата гідродинамічного натиску потоку вимірюваного середовища, при проходженні його крізь сам прилад, за критерій оптимізації прийнято узагальнений критерій ефективності, який базується на критеріях ефективності взаємодії потоку вимірюваного середовища із чутливим елементом перетворювача, що забезпечує високі чутливість системи та точність вимірювання за мінімального впливу на гідродинамічні характеристики вказаного середовища. Визначені проектні параметри, якими є: товщина та ширина чутливого елемента у місці заземлення, довжина (відстані від центру тіла обтікання до лінії заземлення), форма та діаметр тіла обтікання та модуль пружності матеріалу чутливого елемента. Обґрунтовані граничні умови проектних параметрів вимірювальних перетворювачів витрати гідродинамічного типу, які визначають особливості умов вимірювання та конструктивного виконання перетворювача.*

***Ключові слова:** вимірювання витрати, рідина, вимірювальні перетворювачі витрати, оптимізація.*

### **Вступ. Постановка проблеми**

Актуальною на сьогодні є проблема високоточних вимірювань витрати та кількості рідини, включаючи всі її аспекти від розроблення і метрологічних досліджень вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ) до побудови вузлів обліку в конкретних умовах експлуатації.

Одними з тих ВПВ, що використовуються для обліку рідиннофазних потоків за різних режимів їх протікання, є гідродинамічні (ГД) ВПВ.

Принцип дії ГД ВПВ базується на залежності переміщення або коливання чутливого елемента (ЧЕ), який розміщено у потоці вимірюваної рідини, від величини гідродинамічного натиску цього потоку. Такі перетворювачі мають: високі точність та широкий діапазон вимірювання; високі надійність та швидкодію (мала інерційність); конструктивну простоту; зручність обслуговування; незалежність показань від статичного тиску у трубопроводі; високу повторюваність результатів вимірювання.

Для створення ефективних ГД ВПВ із високими метрологічними характеристиками необхідно провести їх оптимізацію завдяки знаходженню раціональних значень конструктивних параметрів, створення вимірювального каналу і ЧЕ з добре обтікаємими формами при мінімізації втрати натиску потоку, не ускладнюючи водночас технологію їх виготовлення; зменшення чутливості

ВПВ до неоднорідності профілю потоку на вході; зменшення перехідної зони між ламінарним і турбулентним режимами.

### **Постановка задачі**

Вихідним сигналом ГД ВПВ є величина деформації чи відхилення ЧЕ, які викликані дією сил гідродинамічного натиску потоку вимірюваного середовища на ЧЕ, що являє собою пружний елемент з тілом обтікання і розміщено у потоці рідини. Тиск сил гідродинамічного натиску, що діють на ЧЕ у вигляді тіла обтікання (ТО) є функцією місцевої швидкості вимірюваного потоку рідини (швидкість у «живому» перерізі  $(S_0 - S_m)$ ), тобто швидкості у перерізі вимірювального каналу  $S_0$  за виключенням міделевої площі ТО  $S_m$ ; форми і розмірів ТО та густини вимірюваного середовища.

Виходячи з цього, задача оптимізації зводиться до заходження раціональних параметрів вимірюваної камери, ТО та ЧЕ в цілому. Враховуючи те, що серед одних з основних вимог до ВПВ є мінімальна втрата гідродинамічного натиску потоку вимірюваного середовища, при проходженні його крізь сам прилад, за критерій оптимізації доцільно прийняти критерій комплексної оцінки впливу приладу на вимірюване середовище при високій чутливості системи вимірювання та ефективності взаємодії ЧЕ з потоком рідини, що забезпечує високу точність вимірювання [1].

$$K_{\text{ефу}} = \frac{A_{\text{вс}}(1 - \delta)}{\Delta p^2}, \quad (1)$$

де  $A_{\text{вс}}$  – величина корисного вихідного сигналу ВПВ;  $\Delta p$  – втрата тиску потоку вимірюваного середовища на перетворювачі;  $\delta$  – похибка вимірювання ВПВ.

### **Особливості оптимізації вимірювальних перетворювачів витрати гідродинамічного типу**

Для одиничного за величиною вихідного сигналу ВПВР вираз (1) набуде виду

$$K_{\text{ефу}} = \frac{(1 - \delta)}{\Delta p^2}. \quad (2)$$

Гідродинамічні ВПВ ефективно використовувати для вимірювання витрати та кількості рідини, що протікає з високими динамічними характеристиками, як в часі так і за величиною. Виходячи з цього, доцільно при оцінці такого типу ВПВ застосовувати величину динамічної похибки, яка описується виразом [2]

$$\delta_{\text{дин}}^i = \frac{\sin \beta}{A \cdot (D_1^2 + C_1^2)} \left\{ e^{-D_1 \tau_i} (-D_1 \sin c \tau_i - C \cos c \tau_i) + C \right\} + \frac{\cos \beta}{A \cdot (D_1^2 + C^2)} \times \left\{ e^{-D_1 \tau_i} (-D_1 \cos c \tau_i - C \cos c \tau_i) + D_1 \right\}; \quad (3)$$

де  $A = \sqrt{1 - \xi^2}$ ;  $\beta = \arctg \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}$ ;  $C_1 = \omega \sqrt{1 - \xi^2}$ ;  $D_1 = \xi \cdot \omega$ ;  $\xi$  – коефіцієнт демпфірування ЧЕ;  $\omega$  – частота вільних коливань ЧЕ.

Втрату тиску  $\Delta p$  на ВПВ можна описати виразом [3]

$$\Delta p = \frac{\xi_d \cdot \rho \cdot u_m^2}{2}, \quad (4)$$

де  $u_m$  – швидкість потоку в міделевому перерізі;  $\xi_d$  – коефіцієнт місцевого опору при обтіканні тіла і визначається за виразом [4]:

$$\xi = k \frac{C_x \cdot \frac{S_m}{S_0} \left(1 - \frac{2y}{D}\right)^{\frac{3}{m}}}{\left(1 - \tau_{\text{ЧЕ}} \cdot \frac{S_m}{S_0}\right)^3}, \quad (5)$$

де  $C_x$  – коефіцієнт лобового опору ЧЕ;  $S_m$  – площа міделя ЧЕ;  $S_0$  – площа живого перерізу потоку до встановлення ЧЕ;  $D$  – діаметр вимірювальної камери;  $y$  – відстань між віссю тіла і віссю потоку;  $\tau_{\text{ЧЕ}}$  – коефіцієнт, що враховує вплив форми ЧЕ та зміну поперечного перерізу вимірювальної камери;  $m$  – показник ступеня,  $k$  – коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкості течії за живим перерізом.

Коефіцієнт  $k$  визначається режимом руху вимірюваного середовища [4]: для ламінарного потоку:

$$k = 2, \quad (6)$$

для турбулентного потоку:

$$k = \frac{(2m+1) \cdot (m+1)}{2m^2}. \quad (7)$$

Коректуючий коефіцієнт  $\tau_{\text{ЧЕ}}$  вибирається залежно від співвідношення площі міделя ЧЕ, що обтікається, та площі трубопроводу, де його встановлено

$$\tau_{\text{ЧЕ}} = f\left(\frac{S_m}{S_0}\right).$$

Враховуючи вирази (7) та (5), залежність, що описує втрату тиску  $\Delta p$  на ВПВ (4), набуде виду

$$\Delta p = \frac{C_x \cdot S_m \left(1 - \frac{2y}{D}\right)^{\frac{3}{m}} \cdot (2m+1) \cdot (m+1) \cdot \rho \cdot u_m^2}{4 \left(1 - \tau_{\text{ЧЕ}} \cdot \frac{S_m}{S_0}\right)^3 m^2 \cdot S_0}. \quad (8)$$

Беручи до уваги залежності (8) та (3), вираз для критерію оптимізації (2) набуде виду

$$K_{\text{ефу}} = \frac{16 \cdot (1 - (B_1 + B_2)) \left(1 - \tau_{\text{ЧЕ}} \cdot \frac{S_m}{S_0}\right)^6 m^4 \cdot S_0^2}{C_x^2 \cdot S_m^2 \left(1 - \frac{2y}{D}\right)^{\frac{6}{m}} \cdot (2m^2 + 3m + 1)^2 \rho^2 \cdot u_m^4}, \quad (9)$$

$$\text{де } B_1 = \frac{\sin \beta}{A \cdot (D_1^2 + C_1^2)} \left\{ e^{-D_1 \tau_i} (-D_1 \sin c \tau_i - C \cos c \tau_i) + C \right\},$$

$$B_2 = \frac{\cos \beta}{A \cdot \left( \begin{matrix} 2 & 2 \\ D & + C \\ 1 & \end{matrix} \right)} \left\{ e^{-D_1 \tau_i} \left( \begin{matrix} -D & \cos c \tau & - C \cos c \tau \\ 1 & i & i \end{matrix} \right) + D_1 \right\}.$$

Отже, задача знаходження максимуму функції (9) зводиться до визначення оптимальних значень коефіцієнта демпфірування  $\xi$ , частоти вільних коливань ЧЕ  $\omega$ , коефіцієнт лобового опору ЧЕ  $C_x$ , відношення площ міделя ЧЕ  $S_m$  і живого перерізу потоку до встановлення ЧЕ  $S_0$  за конкретних умов витрати рідини.

Проведений аналіз математичної моделі ВПВ ГД [5] показав, що коефіцієнт демпфірування і частоти вільних коливань ЧЕ є функціями таких його конструктивних параметрів: ширини ЧЕ у місці заземлення -  $b$ ; товщини ЧЕ -  $h$ ; довжини ЧЕ (відстані від центру ТО до лінії заземлення) -  $l$ ; діаметра ТО -  $d$ ; модуля пружності матеріалу ЧЕ -  $E$ . Коефіцієнт лобового опору ЧЕ  $C_x$  та відношення площ міделя ЧЕ  $S_m$  і живого перерізу потоку до встановлення ЧЕ  $S_0$  залежать від розмірів і форми ТО та ЧЕ в цілому.

Враховуючи визначений вплив цих конструктивних параметрів на метрологічні характеристики всього ВПВ гідродинамічного типу, їх доцільно обрати за оптимізаційні проектні параметри.

### Граничні умови проектних параметрів ГД ВПВ

Для створення ВПВ гідродинамічного типу з мінімальною втратою гідродинамічного натиску потоку вимірюваного середовища необхідно виконання умови [6]

$$\frac{S_0 - S_m}{S_0} \geq 0,65. \quad (10)$$

Міделеву площу ЧЕ можна навести такою залежністю

$$S_m = 0,25 \left[ \arctg \left( \frac{b}{2l} \right) (D^2 - d^2) + \pi d^2 \right]. \quad (11)$$

Площа поперечного перерізу вимірювальної камери визначається за виразом

$$S_0 = \frac{\pi D^2}{4}. \quad (12)$$

Враховуючи вирази (11) і (12) умова (10) після перетворень набуде виду

$$\frac{\arctg\left(\frac{b}{2l}\right)(D^2 - d^2) + \pi d^2}{\pi D^2} \leq 0,35. \quad (13)$$

Вираз (13) є одним із обмежень оптимізаційної задачі, які накладаються на діаметр ТО  $d$ , ширину  $b$  і довжину  $l$  ЧЕ.

Ширина ЧЕ ГД ВПВ в основному регламентується габаритними розмірами тензорезисторних перетворювачів (ТП), які застосовуються для перетворення деформації ЧЕ в електричний сигнал. ТП наклеюються на ЧЕ попарно з обох сторін і з'єднуються у мостову вимірювальну схему. А тому на одній стороні ЧЕ необхідно розмістити не менш двох ТП з однаковою координатою по довжині ЧЕ. Таким чином, ширина ПЕ повинна бути не менше

$$b \geq 2b_T + 3b_{\Pi}, \quad (14)$$

де  $b_T$  – ширина ТП;  $b_{\Pi}$  – ширина провітру між ТП.

На частоту вільних коливань ЧЕ та чутливість ГД ВПВ впливає такий конструктивний параметр як довжина ЧЕ  $l$ . Обмеження, які накладаються на довжину ЧЕ, визначаються, виходячи із конструктивних рішень ВПВ (залежить від діаметра вимірювальної камери  $D$  і товщини стінки трубопроводу) та допустимої довжини ТП.

Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень ЧЕ показав, що для забезпечення високої чутливості і точності ВПВ, довжина ЧЕ повинна задовольняти умову

$$l = (0,5 \div 1,5)D. \quad (15)$$

У ТП однією із технічних характеристик є діапазон вимірюваних відносних деформацій. А тому деформація в зоні розміщення ТП на поверхні ЧЕ не може бути більшою за гранично допустимі значення для конкретних типів ТП

$$\varepsilon_{\max} < \varepsilon_{\partial}, \quad (16)$$

де  $\varepsilon_{\max}$  – максимальне значення деформації ЧЕ за час витрати;  $\varepsilon_{\partial}$  – допустимі значення деформації ТП.

Максимальна деформація ЧЕ  $\varepsilon_{\max}$ , при дії гідродинамічної сили, визначається за виразом

$$\varepsilon_{\max} = \frac{X_m h}{l^2}, \quad (17)$$

де  $X_m$  – максимальне відхилення ЧЕ за період дії витрати.

Для отримання високої чутливості ЧЕ накладаються обмеження і на мінімально допустимі значення деформації ЧЕ при його максимальному відхиленні  $X_m$ . Аналіз результатів проведених досліджень і рекомендацій із застосування ТП [7] показав, що для зменшення похибки перетворень деформації необхідно виконання наступної умови

$$\varepsilon_{\max} > 0,8\varepsilon_0. \quad (18)$$

Отже, в якості обмежень при проведенні оптимізаційних розрахунків параметрів ГД ВПВ доцільно використовувати вирази (13 – 18), що визначають граничні значення проектних параметрів, які необхідно знайти.

Приступаючи до пошуку максимуму цільової функції (9), необхідно знати початкові точки  $l_0, b_0, h_0, d_0$ , а також загальну кількість змінних ( $n$ ), обмежень у вигляді нерівностей і рівнянь та точність оптимізації  $\varepsilon$ .

### **Висновки**

Наведена методика визначення цільової функції та граничних умов проектних параметрів дозволяє розв'язувати задачі знаходження раціональних величин конструктивних параметрів ВПВ гідродинамічного типу за умови високої чутливості системи вимірювання та ефективності взаємодії ЧЕ з потоком рідини, що забезпечує високі метрологічні характеристики.

Подальші дослідження будуть направлені на оцінку впливу гідродинамічних характеристик рідиннофазного середовища на метрологічні характеристики ГД ВПВ при вимірюванні сталих і змінних в часі і за амплітудою потоків.

### **Література**

1. Коробко І. В. Оцінка ефективності вимірювальних перетворювачів витрати рідин і газів // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 111 – 117.
2. Браславский Д. А. Точность измерительных устройств / Д. А. Браславский, В. В. Петров. – М.: Машиностроение, 1976. – 312.
3. Альтшуль А. Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 256 с.
4. Идельчик И. Е. Справочное пособие по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 543 с.
5. Коробко І. В. Визначення порядку ідентифікаційних моделей і динамічних похибок витратомірів рідин швидкозмінних потоків // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2004. – № 3 (30). – С. 79 – 82.
6. Коробко І. В. Визначення коливальної маси чутливого елемента вимірювального перетворювача витрат гідродинамічного типу // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – 2003. – Вип.4, Том 22. – С. 87 – 93.
7. Коробко І. В. Розрахунок моментів опору тертя рідини об поверхню елементів обертання крильчатки / І. В. Коробко, І. А. Гришанова // Вестник НТУУ «КПІ». Серія машиностроение. – 2002. – Вып. 42, т. 1. – С.

*Надійшла до редакції  
15 вересня 2013 року*

© Коробко І. В., 2013