

Н.Б. КЛОЧКО, к.т.н., доцент
С.А. ЧЕХОВСЬКИЙ, к.т.н., професор
М.О. СЛАБІНОГА, к.т.н., доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ

Дослідження фізичної моделі процесу вимірювання об'єму газу турбінними лічильниками методом Монте-Карло

У статті розглянуто практичне застосування математичного методу моделювання фізичних процесів, а саме метод Монте-Карло. На основі розробленої моделі роботи турбінних лічильників газу з аксіальною турбіною отримано числові значення фізичної моделі для визначення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника, які використовуються для побудови графіка густини розподілу та розрахунку довірчого інтервалу, в якому можуть знаходитися шукані значення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу.

Постановка проблеми

Турбінні лічильники газу широко використовуються в інженерній практиці. Простота монтажу та експлуатації в поєднанні з високою надійністю та точністю є достатніми для їх застосування при вирішенні інженерних питань. Ідеальний турбінний лічильник не має сил опору, характеризується нескінченно тонкими лопатками турбіни, сумарна рушійна сила сконцентрована в середній точці радіуса, а також має рівномірний розподіл швидкості на лопаті в осьовому напрямку [1]. Проте в реальних умовах експлуатації турбінних лічильників газу виникають протидіючі моменти, які спотворюють відношення кутової швидкості обертання турбіни до значення об'ємної витрати. Основним параметром турбінних лічильників при їх калібруванні є коефіцієнт перетворення (K). У [2] запропоновано фізичну модель для визначення коефіцієнта перетворення із врахуванням параметрів потоку газу і геометрії турбіни. Саме тому з метою визначення теоретично можливих граничних значень коефіцієнта перетворення автори статті пропонують здійснити прогнозування діапазону зміни значень параметра K .

Аналіз останніх досліджень та публікацій

При метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу основною його характеристикою є коефіцієнт перетворення K , який прямо пропорційний об'єму газу, пропущеному через лічильник, і обернено пропорційний кількості імпульсів отриманих із давача. Опрацювання результатів здійснюють на базі коефіцієнта перетворення. [2] У випадку, коли не має можливості отримати реальні експериментальні значення коефіцієнта перетворення, застосовують методи математичного моделювання, серед яких метод Монте-Карло має багато переваг і використовуються для розв'язування задач у фізиці, математиці, економіці, оптимізації, теорії управління та для прийняття прикладних інженерних рішень [3].

Формулювання мети дослідження

Метою застосування методу Монте-Карло у нашому випадку є мінімізація затрат часу та ресурсів для розрахунків громіздких математичних виразів, які дозволять спрогнозувати межі зміни коефіцієнта перетворення турбінного лічильника в певному діапазоні вимірювання.

Виклад основного матеріалу

У нашому випадку, коли мова йде про фізичну модель вимірювання об'ємної витрати турбінним лічильником необхідно зімітувати процес вимірювання шляхом моделювання зміни вхідних параметрів, задаючись їхнім законом розподілу та областю допустимих

значень. Таким чином експериментальні дослідження турбінних лічильників замінюємо статистичними випробуваннями фізичної моделі процесу. У результаті такого перебору всеможливих комбінацій вхідних параметрів здійснюється кожного разу нова, відмінна від інших реалізація випадкового процесу, тобто щоразу ми отримуємо нове значення моделі вимірювання. Цю множину реалізацій можна використати як деякий штучно отриманий статистичний матеріал, що обробляється звичайними методами математичної статистики.

Метод Монте-Карло широко використовується у всіх випадках симуляції на ЕОМ і для задачі перевірки адекватності моделі та визначення закону розподілу коефіцієнта перетворення лічильника (як основного показника якості вимірювання турбінними лічильниками газу) та його довірчих меж може бути описаний наступним алгоритмом:

1. Відбір ключових змінних моделі вимірювання для моделювання;

2. Визначення умов кореляції, що полягає у встановленні залежності між коефіцієнтом перетворення лічильника і відібраними ключовими змінними;

3. Ймовірнісний розподіл відібраних ключових змінних, що передбачає здійснення наступних етапів:

– визначення обмежень відхилень відібраних ключових змінних;

– встановлення ймовірнісної ваги кожної змінної відповідно до її області допустимих значень.

4. Імітаційне прогнозування, що передбачає генерування випадкових сценаріїв реалізації вимірювання процесу з використанням вибраних випадковим чином вхідних параметрів.

5. Аналіз отриманих результатів потребує здійснення статистичної оцінки та інтерпретації одержаних результатів імітації процесу вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками газу.

Однією із основних вимог імітаційного моделювання за методом Монте-Карло є застосування спеціальних комп'ютерних програм. Це пояснюється тим, що генерування випадкових сценаріїв реалізації (етап 4) повторюються 500–1000 разів для кожної впливової величини, що входить до складу фізичної моделі вимірювання.

Перейдемо до поетапної реалізації методу Монте-Карло. Відбір ключових змінних фізичної моделі здійснимо шляхом визначення ваги кожного параметру, що входить у рівняння. Вагові коефіцієнти пропонується обчислювати за частковими похідними, оскільки похідна функції характеризує швидкість зміни цієї функції, відповідно спосіб відбору ключових параметрів за

частковими похідними придатний для того, щоб оцінити величину впливу кожного з параметрів.

Турбінні газові лічильники призначені і відкалібровані в умовах рівномірного осьового потоку. А це означає, що якщо у потоці газу виникають завихрення на вході турбіни, то залежно від напрямку цих завихрень, турбіна може збільшити або зменшити швидкість обертання, що призведе до завищених або занижених показів лічильника, а отже, споживач або постачальник можуть зазнати втрат. Питанню вдосконалення моделі вимірювання об'ємної витрати присвячено ряд робіт [2,4,5]. Фізична модель роботи турбінних лічильників (1) запропонована у [2] була покладена в основу імітаційного моделювання методом Монте-Карло. Наведемо цю формулу:

$$K = \frac{\tan \beta}{rS} - \frac{0.285n(R+a)SA^{-2} \sin \beta}{\bar{r}^2} \times \left(\frac{St \cdot 4q_v \rho d (\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_{N_2} + x_{CO_2}))}{D^2 \pi (T^{0.5} + 1.37 - 9.09 \rho_c^{0.125}) \cdot 10^{-6}} \right)^{-0.2}, \quad (1)$$

де β — кут нахилу лопаті (кут атаки); A — кільцевий поперечний переріз потоку, m^2 ($A = \pi R^2 - \pi a^2$); \bar{r} — середньоквадратичне значення внутрішнього та зовнішнього радіусів турбіни, m ($\bar{r} = \sqrt{\frac{R^2 + a^2}{2}}$); R — зовнішній радіус турбіни, m ; a — внутрішній радіус турбіни, m ; S — площа поверхні леза лопаті, m^2 ($S = b(R-a)$); n — кількість лопатей турбіни; D — діаметр труби, на якій встановлено турбінний лічильник, m ($D=2R$); ρ_c — густина суміші газу, kg/m^3 ; x_{N_2} — молярна частка азоту; x_{CO_2} — молярна частка діоксиду вуглецю; T — термодинамічна температура газу, K ; k — ентродійний коефіцієнт; St — число Струхала.

Рівняння (1) показує, що нелінійність зміни кутової швидкості за рахунок зміни витрати за нормальних умов експлуатації є функцією деяких основних геометричних параметрів та критерію Рейнольдса. Крім того, застосоване відхилення, яке залежить від гальмівного моменту робочого середовища за умов турбулентного потоку та інших процесів, що супроводжують зміну виду потоку від перехідного і до ламінарного, що свідчить про те, що нехтувати критерієм Рейнольдса не можна [6]. Це основна причина, чому осьові турбінні лічильники рекомендують для турбулентних потоків.

Проаналізуємо математичну модель вимірювання турбінним лічильником газу, що виражена формулою (1) і для неї оцінимо ступінь впливу кожного з параметрів, які входять у модель. До уваги братимуться основні параметри рівняння, а тими параметрами, які визначаються через основні, нехтуємо. Варто зауважити, що моделювання проведено для турбінних газових лічильників ЛГК G250, реальні параметри яких попередньо виміряні. При моделюванні враховано паспортні значення допусків відхилень. Для такого лічильника кількість лопатей становить 12, кут між лопатями 43° , параметри газу взято із паспорту газу. Параметри закону розподілу значень вимірної об'ємної витрати (у формулі (1) на це вказує ентродійний коефіцієнт k) розраховувались авторами і наведені у [2,5].

Відповідно, вирази для обчислення часткових похідних та їх числові значення знайдені за допомогою середовища Mathcad наведені нижче:

– кут атаки:

$$\frac{\partial K}{\partial \beta} = -44,35 \cos(43) + 3292,81 \tan(43)^2 + 3292,81, \text{ що скла-}$$

$$\text{дає } \frac{\partial K}{\partial \beta} = 6,124 \times 10^3;$$

– кількість лопатей турбіни:

$$\frac{\partial K}{\partial n} = -3,7 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial n} = -2,52;$$

– зовнішній радіус турбіни:

$$\frac{\partial K}{\partial R} = -568,54 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial R} = -387,746;$$

– внутрішній радіус турбіни:

$$\frac{\partial K}{\partial a} = -568,54 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial a} = -387,746;$$

– критерій Струхала:

$$\frac{\partial K}{\partial St} = 70,39 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial St} = 48,007;$$

– густина суміші газу:

$$\frac{\partial K}{\partial \rho_c} = 16,29 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial \rho_c} = 11,107;$$

– діаметр тіла турбіни:

$$\frac{\partial K}{\partial d} = 443,46 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial d} = 302,442;$$

– молярна частка азоту:

$$\frac{\partial K}{\partial x_{N_2}} = -5,97 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial x_{N_2}} = -4,69;$$

– молярна частка діоксиду вуглецю:

$$\frac{\partial K}{\partial x_{CO_2}} = 5,97 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial x_{CO_2}} = 4,69;$$

– діаметр труби, на якій встановлено турбінний лічильник:

$$\frac{\partial K}{\partial D} = -181,01 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial D} = -123,446;$$

– термодинамічна температура газу:

$$\frac{\partial K}{\partial T} = -0,027 \sin(43) \text{ та } \frac{\partial K}{\partial T} = -0,018$$

Вагові коефіцієнти визначатимуться за формулою:

$$\gamma_i = \frac{\frac{\partial K}{\partial q_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\partial K}{\partial q_i}} \times 100\%. \quad (2)$$

Відповідно до формули (2), вагові коефіцієнти складають:

$$\gamma_n = 0.19\%; \quad \gamma_R = 30.03\%; \quad \gamma_a = 30.03\%; \\ \gamma_{St} = 3.74\%; \quad \gamma_{\rho_c} = 0.86\%; \quad \gamma_{N_2} = 0.36\%; \quad \gamma_{CO_2} = 0.36\%; \\ \gamma_d = 23.42\%; \quad \gamma_D = 9.56\%; \quad \gamma_T = 0.001\%.$$

Виходячи із вищенаведених значень вагових коефіцієнтів, видно, що найбільший вплив на математичну модель вимірювання турбінним лічильником газу мають геометричні розміри турбіни і дослідної ділянки, а також число Струхала. Саме тому для підвищення

