УДК 622.692.4

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ АПРОКСИМАЦІЇ ОСЕЙ ТРУБОПРОВОДІВ ЗАЛЕЖНО ВІД ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕДУРИ ЗГЛАДЖУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

А.П.Олійник, Х.В.Мартинюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) ;
e-mail: public@nung.edu.ua

Рассмотрено разные способы задания параметров процедуры сглаживания экспериментальных данных о перемещении осей трубопроводов. Исследовано влияние на процедуру сглаживания точности измерения перемещений и весовых коэффициентов. Проведено расчеты для реальных участков трубопроводов, определено оптимальные параметры процедуры сглаживания, оценено точность определения напряжений в исследуемых участках трубопроводов.

The different kinds of pipeline axis displacements experimental values smoothing procedure are considered. The influence of the displacement measuring accuracy and the weight coefficients on the smoothing procedure is investigated. The calculation for the real pipeline's sections are made, the optimal smoothing procedure parameters are defined, the accuracy of the tested pipeline's sections stresses determination is estimated.

При вирішенні багатьох задач технічної діагностики виникає необхідність вирішення оберненої задачі відтворення фізико-механічних полів в певній області, що моделює реальну систему за їх значеннями на певній множині точок цієї області [1]. Зокрема, для оцінки напружено-деформованого стану трубопроводів різного призначення використовуються дані про переміщення точок їх поверхні, які визначаються з використанням різних експериментальних методів [2, 3]. Одним з найбільш поширених методів відтворення лінії за відомими координатами деякої множини її точок є апарат згладжуючих інтерполяційних сплайнів, який дає змогу за відомими значеннями координат (N+1) точок вузлів інтерполяції $O_k\left(x_k;\widetilde{f}_k\right)$ знайти функцію u(x), яка мінімізує на відрізку інтерполяції [a; b] функціонал,

$$\Phi(u)=\int_a^b\left[u''(x)^2\right]dx+\sum_{k=0}^{N}p_k\left[u(x_k)-\widetilde{f}_k\right]^2, \quad (1)$$

причому функція $u(x)$ є двічі неперервно диференційованою на відрізку [a;b], а p_k – деякі додатні числа, що називаються ваговими коефіцієнтами [4]. Алгоритми мінімізації (1) та знаходження u(x) є відомими, проте практичне використання методики потребує задання або визначення способу оцінки коефіцієнтів p_k , який давав би змогу, по-перше, одержувати фізично реальні характеристики ліній, що відтворюються, а, по-друге, обмежити процедуру згладжування певними значеннями коефіцієнтів p_k. Існують способи задання коефіцієнтів p_k [2], які пов'язують вибір коефіцієнтів p_k з інформацією про точність ε вимірювання координат вузлових точок $O_k\left(x_k;\widetilde{f}_k\right)$. В тих випадках, коли відомими є результати вимірювання напружень на досліджуваній ділянці магістрального трубопроводу, розроблено методику оцінки величини ε , яка характеризує точність вимірювання переміщень, що дає змогу встановлювати параметри згладжування експериментальних значень переміщень для ділянок, на яких напруження не вимірюються експериментально [5]. Для розрахунку вагових коефіцієнтів будується ітераційна процедура, яка може бути задана формулою

$$p_k^{(j+1)}=p_k^{(j)}\frac{u^{(j)}(x_k)-\widetilde{f}_k}{\varepsilon}, \quad (2)$$

де j – номер кроку ітераційного процесу.

Згідно з відомою процедурою знаходження мінімуму функціонала (1) лінія $u^{(j)}(x)$ може бути побудована для довільного набору p_k на кожному кроці ітераційної процедури. Формула ітераційною може бути записана і в іншому вигляді

$$p_k^{(j+1)}=p_k^{(j)}\frac{\varepsilon}{u^{(j)}(x_k)-\widetilde{f}_k}. \quad (3)$$

В тих випадках, коли величина ε є заданою, результати згладжування залежать лише від способу задання вагових коефіцієнтів в функціоналі (1), тобто, від швидкості збіжності ітераційних процедур (2) та (3), проте в більшості випадків величина ε також є невідомою, і для її визначення необхідно використовувати додаткову інформацію про геометрію досліджуваного тіла в недеформованому стані. Виникає питання про збіжність побудованих ітераційних процедур і критерії зупинки ітераційного процесу та оцінку впливу параметрів ε та p_k на адекватність одержаних згладжених результатів реальній фізичній картині процесу деформування трубопроводу. У випадку, коли вибір коефіцієнтів p_k здійснюється з використанням (2), то реалізація ітераційної процедури проводиться за таким алгоритмом: задають початкові значення $p_k^{(0)}$, $k=0,\ldots,N$, причому виконується умова

$$p_k^{(0)} << 1. \quad (4)$$

У випадку , коли $p_k^{(0)} = 0$, задача мінімізації функціонала (1) призводить до одержання або прямої лінії $u(x) = ax + b$, або константи $u(x) = C$, для якої коефіцієнти a та b за відомими значеннями координат вузлових точок $O_k\left(x_k; \widetilde{f}_k\right)$ можуть бути знайдені, наприклад, за методом найменших квадратів. При виконанні умови (4) розв'язок задачі (1) призводить до одержання кривої u(x), яка близька до прямої лінії (коефіцієнт кореляції R=0,999), проте ця лінія ніяким чином не відображає якісну залежність, що описується точками O_k. Значення коефіцієнта у формулі (2) задовольняє умові

$$\frac{u^{(0)}(x_k) - \widetilde{f}_k}{\varepsilon} > 1, \quad (5)$$

тому здійснюється перехід до нових значень $p_k^{(1)}$

$$p_k^{(1)} = p_k^{(0)} \frac{u^{(0)}(x_k) - \widetilde{f}_k}{\varepsilon}, \quad (6)$$

причому значення $u^{(0)}(x_k)$ в (6) визначається за лінією $u^{(0)}(x)$, яка є розв'язком задачі (1) на даному кроці. Ітераційна процедура повторюється доти, поки для будь-якої точки x_k починає виконуватись умова

$$\frac{u^{(j)}(x_k) - \widetilde{f}_k}{\varepsilon} < 1. \quad (7)$$

Виконання умови (7) дає змогу врахувати похибку ε вимірювання експериментальних значень координат вузлових точок $O_k\left(x_k; \widetilde{f}_k\right)$. Якщо задати значення ε таким, що вже на першому кроці виконується умова (7), то в такому випадку ітераційна процедура зупиниться на цьому ж кроці, оскільки рівень точності вимірювання координат ε є настільки низьким, що використання інтерполяційних сплайнів є взагалі недоцільним, а для одержання наближених характеристик ліній доцільно використовувати апроксимацію за методом найменших квадратів. Фактично ітераційна процедура (2) реалізує поступове наближення дискретної залежності $\left\{x_k, \widetilde{f}_k\right\}$ з лінійною або квазілінійною початковою апроксимацією, а критерієм його зупинки є умова (7). Збіжність цієї процедури зумовлюється монотонним ростом $p_k^{(j)}$ на кожному кроці ітераційного процесу, що зумовлено використанням умови (5), причому справедливою є така оцінка:

$$\frac{u^{(j)}(x_k) - \widetilde{f}_k}{\varepsilon} > \frac{u^{(j+1)}(x_k) - \widetilde{f}_k}{\varepsilon} \quad \forall j, \quad (8)$$

що зумовлює гарантоване виконання умови (7). На швидкість реалізації ітераційного процесу впливає величина ε та початкова величина коефіцієнтів $p_k^{(0)}$.

Реалізація ітераційної процедури (3) пов'язана з заданням початкового наближення у вигляді

$$p_k^{(0)} >> 1, \quad (9)$$

тобто, початкове наближення $u^{(0)}(x)$ фактично є інтерполяційним кубічним сплайном, побудованим за значеннями функціоналів у вузлах інтерполяції $O_k\left(x_k; \widetilde{f}_k\right)$. В такому випадку (згідно з (3)) на кожному кроці ітераційної процедури значення $p_k^{(j)}$ спадають, а криві $u^{(j)}(x)$ віддаляються від початкової кривої $u^{(0)}(x)$, при цьому ітераційна процедура зупиняється, коли для будь-якої з точок x_k вперше виконується умова

$$\frac{u^{(j)}(x_k) - \widetilde{f}_k}{\varepsilon} > 1. \quad (10)$$

Умова (10) починає виконуватись на певному кроці ітераційної процедури, оскільки в даному випадку справедливою є умова

$$\frac{u^{(j)}(x_k) - \widetilde{f}_k}{\varepsilon} < \frac{u^{(j+1)}(x_k) - \widetilde{f}_k}{\varepsilon} \quad \forall j, \quad (11)$$

З практичної точки зору важливим є те, що при реалізації вказаних процедур для дослідження технічних систем значення ε є або відомим з характеристик відповідних вимірювальних систем, або підлягає оцінці з використанням спеціальних експериментальних досліджень. Тому найбільш важливим є вибір відповідних значень $p_k^{(0)}$, $k = 0,\ldots,N$. Як правило, такий вибір можна здійснити з урахуванням необхідного рівня точності оцінки похідних величин (напружень, деформацій, температур тощо). Крім того, слід враховувати при реалізації процедури (2), що початкові значення коефіцієнтів $p_k^{(0)}$ не можуть бути близькими до нуля ($p_k^{(0)} \sim 10^{-10}$), оскільки при цьому можуть виникати похибки при обертанні матриць, елементами яких є комбінації величин $p_k^{(0)}$.

За результатами реалізації вказаних алгоритмів при згладжуванні експериментальних даних про переміщення точок осі ділянки магістрального трубопроводу можна зробити такі висновки.

При згладжуванні експериментальних даних про переміщення точок осі магістральних трубопроводів „Союз" та ДУГ-ІІ (діаметр 1420 мм) встановлено, що величина, яка характеризує точність вимірювання $\varepsilon = 0{,}02\text{-}0{,}07$ м, причому вказані дані одержані при аналізі даних по 3 ділянках в гірській місцевості в різний період доби. Наведені результати одержані з урахуванням проектних даних про просторове положення магістрального трубопроводу, інформації про радіуси кривини, які обернено пропорційні другій похідній функції, що моделює деформовану вісь трубопроводу — саме ця обста-

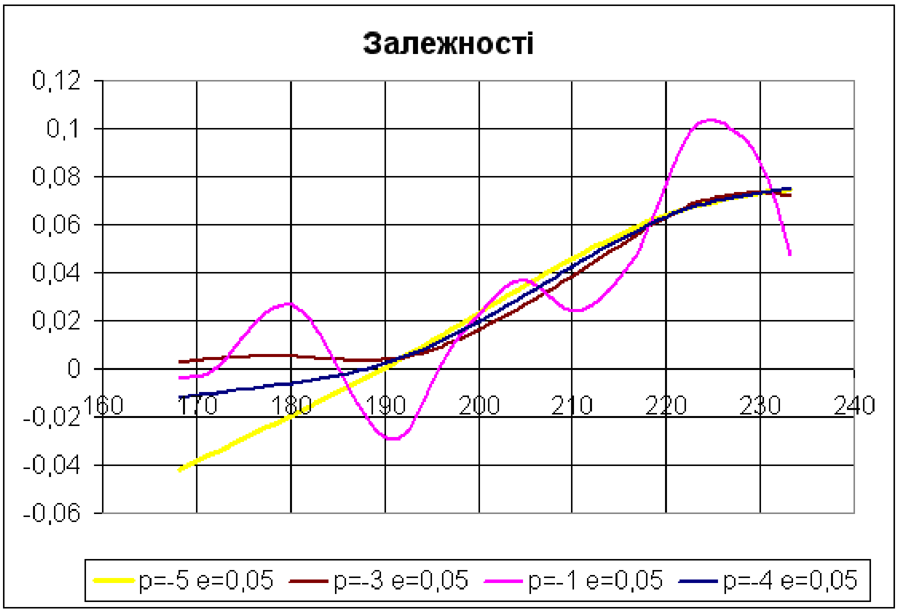

Рисунок 1 — Залежність між порядком величини p_k та конфігурацією осі трубопровода при заданому рівні точності вимірювання координат точок ε=0,05 м (довжина ділянки L=70 м)

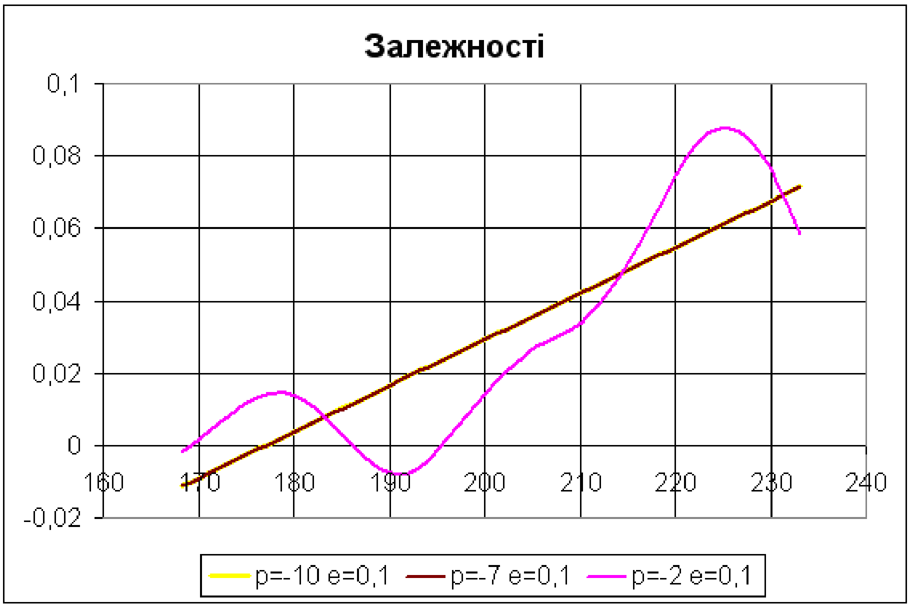

Рисунок 2 — Залежність між порядком величини p_k та конфігурацією осі трубопровода при малих значеннях p_k (10^{-7} – 10^{-10}) при рівні точності ε=0,1 м, L=70 м

вина є вирішальною при виборі параметрів згладжування, оскільки похибка вимірювання переміщень зумовлює одержання замість реальної кривої деякої збуреної кривої, яку можна розглядати як близьку до незбуреної з нульовим порядком близькості, тобто максимальна відстань між точками кривої може бути близькою до нуля, тоді як відстань між похідними першого та вищих порядків на досліджуваному відрізку не прямує до нуля [6].

Для заданих значень величини ε значення коефіцієнтів p_k, які дають конфігурації осі, що найкраще відображають конфігурацію реального об’єкта, мають порядок 10^{-3} – 10^{-4} (рис. 1).

При фіксованих значеннях ε зменшення величини p до порядків 10^{-7} – 10^{-10} призводить до одержання практично прямолінійних осей трубопроводів, що не відповідає реальній конфігурації (рис. 2).

При значеннях 10^{-3} – 10^{-4} похибка вимірювання напружень, що виникають в матеріалі трубопроводу на ділянці 100 м, становить ± 20 МПа, що є цілком задовільним для проведення розрахунків за оцінкою напружено-деформованого стану об’єктів.

Робота в даному напрямку може бути продовжена з метою розробки ефективних методів оцінки точності вимірювання переміщень точок трубопроводів, аналізу залежності між параметрами p_k та ε від реальної конфігурації об’єкта (гладкість функцій, що моделюють осі трубопроводів, швидкість їх росту, кривизна тощо).

Література

1. Чекурін В.Ф., Олійник А.П. Некоректна задача відновлення напружено-деформованого стану криволінійних циліндричних тіл за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні // Крайові задачі термомеханіки. – К.: Ін-т математики НАН України, 1996. – Ч.2. – С. 160-164.
2. Перун И.В. Магистральные трубопроводы в горних условиях. – М.Недра, 1987. – 175 с.
3. Olijnik A., Robur L., Jarovoi L. Determination of stress-deformation state of vibrating constructions by fiber Laser Doppler anemometer. – Third International Conference "Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications", 1998, Proc. SPIE, V.3411, p.404-407.
4. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1989. – 608 с.
5. Мартинюк Х.В., Олійник А.П. Математичне моделювання напружено-деформованого стану ділянок трубопроводу з оптимізацією процедури згладжування початкових даних // Методи та прилади контролю якості. – 2005. – № 13. – С. 21- 25.
6. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высш. школа, 1989. – 263 с.

УДК 681.3.06+681.518.54.621.51

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК НАГНІТАЧА ПРИРОДНОГО ГАЗУ

М.І.Горбійчук, М.І.Когутяк, О.А.Сріпка

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42331; e-mail: p u b l i c @ n u n g . e d u . u a

Рассматривается алгоритм идентификации параметров диагностической модели центробежного нагнетателя природного газа, которая учитывает энергетические затраты на трение и утечки газа и приведены результаты его апробирования на промышленных данных

The algorithm of identifying of arguments of diagnostic model of a centrifugal supercharger of gas distillate is esteemed, which one allows for power expenditures for abrasion and gas escapes and the outcomes it are reduced are checked on industrial data's.

1 Постановка задачі

В роботі [1] запропонована діагностична модель відцентрованого нагнітача природного газу, яка має такий вигляд:

$$\left(\frac{z_1\varepsilon}{z_2}\right)^{\frac{m-1}{m}} = 1 + \frac{\omega^2}{z_1RT_1}X_0 - \\ - \frac{Q_1\omega}{z_1RT_1}\left(X_2\varepsilon^{\frac{1}{m}} - X_1\right), \quad (1)$$

де: z_1, z_2 – коефіцієнти стисливості газу відповідно за умов входу і виходу;

ε – ступінь стискування газу;

ω – кутова швидкість обертання колеса нагнітача;

R – газова постійна;

Q_1 – об'ємна витрата газу приведена до умов всмоктування;

T_1 – температура газу на вході в нагнітач;

m – показник політропи.

Величини X, Y_1 і Y_2, що входять в формулу (1), обчислюються у відповідності з такими співвідношеннями:

$$X_0 = \frac{D_2^2 - D_1^2}{2}, \quad (2)$$

$$X_i = \frac{D_i}{\pi D_i^2 - r\delta_i b_i} ctg\beta_i,\ i = 1, 2. \quad (3)$$

де: D_1, D_2 – внутрішній і зовнішній діаметри нагнітача;

β_1, β_2 – кут нахилу лопаток на вході і виході колеса;

δ_1, δ_2 – товщина лопаток на вході і виході нагнітача;

b_1, b_2 – товщина відцентрового колеса на вході і на виході;

r – кількість лопаток.

Оскільки величини X, Y_1 і Y_2 визначаються виключно конструктивними параметрами нагнітача і пов'язані з технологічними параметрами через рівняння (1), то їх прийнято за діагностичні ознаки [1].

Для визначення технічного стану відцентрового нагнітача в [1] запропонована така методика. На протязі однієї доби за дев'ятьма замірами визначались параметри X, Y_1 і Y_2, що входять в модель (1). Результати усереднювались, і для кожної діагностичної ознаки обчислювався довірчий інтервал при ступеню надійності 0,95. Зміна діагностичної ознаки призво-