УДК 622.692.4

ПРИНЦИПИ ВИБОРУ АПРОКСИМУЮЧИХ ФУНКЦІЙ В ЗАВДАННЯХ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ВНУТРІШНЬОТРУБНОЇ ІНСПЕКЦІЇ

А.П.Олійник, Л.М.Іванчук, Б.С.Незамай

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342),
e-mail: duol@il.if.ua

Розглянуто модель процесу деформування ділянок трубопроводів з використанням даних внутрішньотрубної інспекції. Запропоновано методику вибору функцій, що апроксимують деформовані перерізи. Розглянуто різні моделі деформування перерізів, запропоновано методику вдосконалення алгоритму згладжування даних під час побудови моделей процесу деформування перерізів. Проведено тестові розрахунки та проаналізовано одержані результати.

Ключові слова: інтелектуальні поршні, трубопроводи, перерізи, деформації, близькість кривих.

Расмотрена модель процесса деформирования участков трубопроводов с использованием данных внутритрубной инспекции. Предложена методика выбора функций, апроксимирующих деформированые сечення. Рассмотрены различные модели деформирования сечений, предложена методика усовершенствования алгоритма сглаживания данных при построении модели процесса деформирования сечений. Проведены тестовые расчеты и проанализированы полученные результаты.

Ключевые слова: інтеллектуальные поршни, трубопроводы, сечения, деформации, близость кривых

The pipeline's sections deformation process model is considered using the intratubal inspection data. The approximation function for the deformated fragment's section selection is suggested. The different models of the section's deformation are considered, the method of the data smoothing algorithm improvement in the section deformation process model design is suggested. The test calculations results are given, the one's results are analyzed.

Keywords: intellectual piston (pigs), pipelines, profile, deformation, the curve nearness

Під час оцінювання напружено-деформованого стану трубопроводів різного призначення (НДС) використовуються апаратні засоби, принцип роботи яких базується на використанні ефектів взаємодії фізичних полів різної природи [1]. При цьому важливого значення набуває використання математичного апарату для кількісної оцінки вказаної взаємодії. Часто використання математичного апарату дає змогу одержати основну частку інформації про досліджуваний об'єкт, тому можна говорити про математичні методи контролю технічного стану трубопроводів, і, зокрема, його НДС [2]. Математичний апарат обробки даних внутрішньотрубної інспекції за допомогою апаратури, виготовленою фірмою "Rozen Europe B.V.", дає змогу суттєво підвищити ефективність цих методів, оскільки, як можна встановити шляхом аналізу робіт [3], діагностичні поршні XYZ-Mapping уможливлюють одержання поля тривимірних координат осі трубопроводу, визначення деформації поверхні, овальності, зміни радіуса трубопроводу на певному наборі перерізів у кількох точках за полярним кутом. Вказана інформація на даний момент не використовується для оцінки НДС трубопроводу або його зміни, хоча при використанні математичного апарату її цілком достатньо для оцінки параметрів НДС – всіх компонент тензорів деформацій та напружень. При цьому можна застосовувати відому методику оцінки НДС трубопроводу або його зміни [4] за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні. Як правило, ця методика використовувалась для оцінювання НДС трубопроводу за відомими переміщеннями точок, що розташовуються на верхній твірній трубопроводу або ж на його осі [5], проте, аналізуючи дані внутрішньотрубної інспекції, її можна узагальнити для більш широкого класу множин, на яких задаються переміщення точок, наприклад, для випадку, коли переміщення задаються на деякій дискретній множині точок перерізу трубопроводу. Необхідно розглянути клас умов, яким повинні задовольняти функції, що характеризують геометрію трубопроводу та його зміну, оскільки, як було зазначено, використання діагностичних поршнів дає змогу одержати координати точок перерізу з певним кроком за полярним кутом та оцінити їх переміщення.

В пов'язаній з досліджуваним тілом системі координат $(s;\varphi;r)$, де s – поздовжня координата, φ – полярний кут, r – радіальна координата записується як радіус-вектор точки труби у вигляді [2]:

$$\vec{r}(s,\varphi,r,t)=\vec{r}_c(s,\varphi,r,t)+[\vec{n}_c(s,\varphi,r,t)\times \\ \times\sin\omega(s,\varphi,r,t)+\vec{b}_c(s,\varphi,r,t)\cos\omega(s,\varphi,r,t)]\times \\ \times\rho(s,\varphi,r,t)+\vec{\tau}_c(s,\varphi,r,t)\psi(s,\varphi,r,t)\,, \quad (1)$$

де: $\vec{r}_c$ – радіус-вектор точки на осі трубопроводу; $\vec{n}_c;\vec{b}_c;\vec{r}_c$ – нормаль, бінормаль та дотична до осі трубопроводу; $\rho(s,\varphi,r,t);\omega(s,\varphi,r,t);\psi(s,\varphi,r,t)$ – функції, що задають зміну геометрії трубопроводу: $\rho(s,\varphi,r,t)$ – у радіальному напрямку; $\omega(s,\varphi,r,t)$ – у напрямку полярного кута; $\psi(s,\varphi,r,t)$ – у поздовжньому напрямку. Задаючи вказані функції в різній аналітичній формі, можна одержати розв'язки задач, що відповідають різним способам навантажень (задача Ламе, задача кручення стрижнів, задача про чистий згин). Загалом, коли задано лише переміщення контрольних точок, при побудові функцій геометрії необхідно здійснювати з дотриманням певних додаткових умов, які випливають з таких міркувань: подання (1) повинно описувати малі деформації пружного характеру, а також найпростіші випадки пластичних деформацій, тому функції зміни геометрії $\rho(s,\varphi,r,t);\omega(s,\varphi,r,t)$ та $\psi(s,\varphi,r,t)$ повинні мало змінюватись з часом – наприклад, якщо в деяких випадках для функції $\rho(s,\varphi,r,t)$ справедливим є подання:

$$\rho(s,\varphi,r,t)=r+\rho_1(s,\varphi,r,t)\ , \qquad (2)$$

то можна припустити, що на функцію $\rho_1(s,\varphi,r,t)$ накладаються додаткові умови:

$$\begin{cases}\rho_1(s,0,r,t)=r+\rho_1(s,2\pi,r,t);\\ \left|\rho_1(s,\varphi,r,t)\right|<\varepsilon_1; \quad \left|\nabla\rho_1(s,\varphi,r,t)\right|<\varepsilon_2,\end{cases} \qquad (3)$$

де: $\nabla\rho_1(s,\varphi,r,t)$ – градієнт функції; $\varepsilon_1;\varepsilon_2$ – достатньо малі додатні числа. Це певною мірою уможливлює встановлення умови на функції геометрії, проте у разі практичного використання такого підходу необхідно дати більш чіткий спосіб вибору як функції $\rho_1(s,\varphi,r,t)$, так і величини ε_1 та ε_2. При цьому можна використати поняття близькості кривих [6]: криві $f(t)$ та $g(t)$ називають близькими порядку близькості k, якщо виконується умова:

$$\left|f^{(i)}(t)-g^{(i)}(t)\right|<\varepsilon \quad \forall\varepsilon>0, i=0;1;...;k\ . \qquad (4)$$

Накладання на функції геометрії умов близькості порядку 2 за всіма аргументами уможливлює врахування таких вимог, що витікають з фізичної картини процесу деформування:

а) деформації трубопроводу є малими в порівнянні з характерними розмірами об'єкта;

б) поверхня трубопроводу в процесі деформування залишається достатньо гладкою (умови близькості похідних);

в) в кожній точці досліджуваної ділянки трубопроводу радіуси кривини за головними напрямками змінюються мало.

Вказані положення дозволяють при виборі функції геометрії використовувати або відомі аналітичні формули подання перерізів до та після деформації, або встановити нові, більш точні підходи до вибору алгоритмів інтерполяції або апроксимації перерізів.

Розглянемо важливі часткові випадки:

а) наближення перерізу, що до деформації мав форму кола, еліптичною конфігурацією:

Якщо початкова конфігурація перерізу трубопроводу має форму кола, то для її моделювання можна задати таку функцію:

$$y_1=\sqrt{R^2-x^2}; \quad x\in[-R;R]\ . \qquad (5)$$

При цьому деформований переріз моделюється еліптичною конфігурацією:

$$y_2=(R+\varepsilon_2)\sqrt{1-\frac{x^2}{(R+\varepsilon_1)^2}}\ . \qquad (6)$$

Порівнюючи похідні функцій (5) та (6):

$$y_1'=-\frac{x}{\sqrt{R^2-x^2}};\ y_1''=-\frac{R^2}{(R^2-x^2)^{3/2}}; \qquad (7)$$

$$\begin{aligned} y_2'&=\frac{R+\varepsilon_2}{R+\varepsilon_1}(-1)\frac{x}{[(R+\varepsilon_1)^2-x^2]^{1/2}};\\ y_2''&=-\frac{(R+\varepsilon_1)(R+\varepsilon_2)}{[(R+\varepsilon_1)^2-x^2]^{3/2}},\end{aligned} \qquad (8)$$

можна зробити висновок про те, що рівності (7) та (8) співпадають при $\varepsilon_1\to0;\varepsilon_2\to0$. Тому використання для моделювання деформованих конфігурацій залежності (6) дає змогу моделювати деформовані перерізи, особливо в тих випадках, коли вказана деформація обумовлена зміною форми осі трубопроводу [7], причому особливо важливим є те, що формула (6) може бути використана для всього перерізу.

б) наближення перерізу, що до деформації мав форму кола, параболічною конфігурацією:

Якщо початкова конфігурація перерізу задається співвідношенням (5), то деформований переріз можна задавати співвідношенням (6), проте його використання пов'язане з використанням складної аналітичної формули. Виникає питання, чи можна замінити (6) більш простою конфігурацією, наприклад, параболічною залежністю виду:

$$y=ax^2+bx+c, \quad x\in[-kR;kR];\ 0<k<1, \qquad (9)$$

причому парабола (9) повинна проходити через точки:

$$\begin{aligned} &x_1=-kR; \quad y_1=\sqrt{R^2-k^2R^2}\\ &x_2=0; \quad y_2=R\\ &x_3=kR; \quad y_3=\sqrt{R^2-k^2R^2}\end{aligned} \qquad (10)$$

В такому випадку (9) записується у вигляді:

$$y=\frac{\sqrt{1-k^2}-1}{k^2R}x^2+R, \qquad (11)$$

і, оцінюючи виконання умов близькості II-го порядку, можна вказати, що при $k=0{,}4$ криві (9) та (5) мало відхиляються на даному відрізку: максимальне значення відхилення складає 0,0013R, що є задовільним для технічних розрахунків.

в) моделювання деформованих перерізів за даними про переміщення точок перерізу, одержаними за результатами внутрішньотрубної інспекції.

При відновленні форми перерізу трубопроводу за даними внутрішньотрубної інспекції доцільно використовувати інтерполяційний кубічний сплайн зі згладжуванням даних [2]. При традиційному використанні такого сплайну згладжуюча функція $g(x)$ мінімізує на класі $W_2^2[a;b]$ функціонал виду

$$\Phi_1(u) = \int_a^b \left[u''(x)^2\right]dx + \sum_{k=0}^{n} p_k \left[u(x_k) - \widetilde{f}_k\right]^2, \quad (12)$$

де: p_k – коефіцієнти згладжування, деякі додатні числа, величина яких впливає на врахування в (12) умов інтерполяції; $\widetilde{f}_k$ – координати точки в вузлах інтерполяції, одержані експериментальним шляхом. Алгоритм побудови такого сплайну є відомим, з метою побудови методами інтерполяції кривої, що задає форму деформованого перерізу, функціонал (12) необхідно модифікувати так: нехай (x_i, f_i) – це значення координати точки, одержане шляхом проведення внутрішньотрубної інспекції. За цими координатами знайдемо характеристики кола, що найкраще наближає вказану залежність: якщо рівняння кола:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2, \quad (13)$$

то величини $x_0; y_0; R^2$ знайдемо за методом найменших квадратів шляхом мінімізації функції:

$$s(x_0; y_0; R) = \\ = \sum_{i=1}^{n} [(x_i - x_0)^2 + (f_i - y_0)^2 - R^2]^2, \quad (14)$$

мінімізація якої завжди існує. За знайденими $x_0; y_0; R^2$ одержуємо:

$$y = y_0 \pm \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}. \quad (15)$$

Алгоритм згладжуючого кубічного сплайну реалізуємо шляхом мінімізації (12) з єдиним уточненням: величини f_k вибираються за формулою:

$$\widetilde{f}_k = tf_k + (1 - t)y_k, \quad t \in [0;1]. \quad (16)$$

Якщо $t = 0$, то інтерполяційний згладжуючий сплайн буде будуватись з урахуванням вузлів, розміщених на колі (15), при цьому

$$y_k = y_0 \pm \sqrt{R^2 - (x_k - x_0)^2}; \quad (17)$$

у випадку $t = 1$ інтерполяційний згладжуючий сплайн будується за координатами експериментально визначених точок (x_k, f_k). Введення параметра t дає змогу враховувати умову близькості кривих другого порядку для деформованого та недеформованого перерізу. Якщо відомо, що переріз уже в початковий момент мав певну еліптичність, рівняння (13) можна замінити рівнянням еліпса вигляду

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1; \quad (18)$$

в такому випадку обчислюються величини $x_0; y_0; a^2; b^2$. Зазначимо, що інтерполяційний кубічний сплайн при цьому будується з урахуванням періодичності граничних умов, або ж для заданих значень похідних в граничних точках. Для проведення модельних розрахунків напружено-деформованого стану для трубопроводу з деформованими перерізами використовуються відомі результати задачі Ламе для фізичних компонент тензора напружень [8], в яких за значення внутрішнього та зовнішнього радіусів трубопроводу вибираються величини, обчислені за формулами:

$$\begin{cases} R_в = \dfrac{(1 + f_в'(x)^2)^{3/2}}{\left|f_в''(x)\right|}; \\ R_з = \dfrac{(1 + f_з'(x)^2)^{3/2}}{\left|f_з''(x)\right|}, \end{cases} \quad (19)$$

де $f_з; f_в$ – функції, побудовані за запропонованими алгоритмами для деформованих внутрішньої та зовнішньої поверхонь.

Для труби з еліптичним поперечним перерізом, який задається формулами:

$$\begin{cases} H_в(x) = \dfrac{R_в - \varepsilon}{R_в}\sqrt{R_в^2 - x^2} \\ H_з(x) = \dfrac{R_з - \varepsilon}{R_з}\sqrt{R_з^2 - x^2} \end{cases} \quad (20)$$

проведемо числові розрахунки, результати яких наводяться в таблиці 1 ($R_з = 0{,}71 м$, $R_в = 0{,}71 - 0{,}016 м$, $E = 210000 МПа$, $\sigma = 0{,}3$.

Встановлено, що за невеликих рівнів еліптичності кільцеві напруження мало відрізняються від напружень, що виникають в трубах з кільцевою формою перерізу, тоді як при значеннях $\varepsilon_1 = 0.15$ вказані величини відрізняються вже суттєво, тому використання при цьому нормативних залежностей для розрахунку кільцевих напружень може призвести до суттєвих похибок.

В таблиці 2 зведено результати розрахунків перерізів, що задаються залежностями (5) та (9), аналізуючи які можна зробити такі висновки: моделювання профілю перерізу з використанням параболічних залежностей свідчить, що у випадку, коли на деякому сегменті форма перерізу має параболічну конфігурацію, значення кільцевих напружень суттєво відрізняються від значень цих напружень для перерізу з конфігурацією у формі кола.

Розроблена методика дає змогу вдосконалити систему внутрішньотрубного діагностування, збільшити його можливості в плані одержання кількісної інформації про напруження, що виникають в матеріалі трубопроводу. Встановлено, що величина діючих в трубопроводі напружень суттєво залежить від форми поперечного перерізу. Вказані підходи до побудови функцій геометрії можуть бути використані і під час побудови функцій $\omega(s, \varphi, r, t)$ та $\psi(s, \varphi, r, t)$, а також для визначення ступеня зміни векторів $\vec{n}_c; \vec{b}_c; \vec{r}_c$ (1).

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз кільцевих напружень для еліптичних перерізів

ε_1	Кільцеві напруження для труби з круглим поперечним перерізом, МПа	Максимальні кільцеві напруження для труби з еліптичним поперечним перерізом, МПа	Мінімальні кільцеві напруження для труби з еліптичним поперечним перерізом, МПа
0.06	91	99	74
0.07	91	100	72
0.08	91	102	69
0.09	91	104	67
0.1	91	106	64
0.11	91	108	62
0.12	91	109	59
0.13	91	112	56
0.14	91	114	55
0.15	91	118	53

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз кільцевих напружень для параболічних перерізів

k	Кільцеві напруження для труби з круглим поперечним перерізом, МПа	Максимальні кільцеві напруження для труби з параболічним поперечним перерізом, МПа	Мінімальні кільцеві напруження для труби з параболічним поперечним перерізом, МПа
0.6	91	282	82
0.5	91	275	85
0.4	91	270	87
0.3	91	267	89
0.2	91	265	90
0.1	91	264	91

Література

1 Клюєв В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / [В.В.Клюев, Р.Ф.Сослин, А.В.Ковалев и др.]; под ред. В.В.Клюева. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.

2 Заміховський Л.М. Математичний апарат для контролю напружено-деформованого стану трубопроводів: Наукове видання / Л.М. Заміховський, А.П. Олійник. – Івано- Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – 306 с.

3 Болгаченко Т.О. Проблеми і методи обробки та аналізу отриманих даних в задачах контролю технічного стану трубопроводів з використанням внутрішньотрубних дефектоскопів / Т.О. Болгаченко // Наукові вісті ІМЕ “Галицька академія. – 2007. – №1(11). – С.144 – 147.

4 Чекурін В.Ф. Некоректна задача відновлення напружено-деформованого стану криволінійних циліндричних тіл за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні / В.Ф. Чекурін, А.П. Олійник // Крайові задачі термомеханіки. – 1996. – Ч.ІІ – С. 160-165.

5 Олійник А.П. Вплив базису функцій на точність мінімізації функціонала енергії криволінійної балки за методом Рітца. // Прикл. проблеми мех. і мат. – 2004. – Вип.2. – С. 166-170.

6 Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие для вузов / А.Г. Александров. – М.: Высшая школа, 1989 – 236 с.

7 Олійник А.П. Математичне моделювання процесу деформування ділянки трубопроводу з урахуванням зміни форми перерізу / А.П. Олійник // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2009. – №3(9). – С.153-156.

8 Седов Л.И. Механика сплошных сред / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1984. – 560 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 17.03.10

Рекомендована до друку професором ***Горбійчуком М.І.***