

УДК 004.9:681.5

Чекурін В.Ф.

Інститут прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача
Національної академії наук України, Куявсько-Поморський університет в Бидгощі, Польща

Пономарьов Ю.В.

Науково-дослідний інститут транспортування газу АТ «Укртрансгаз»

Химко О.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОД КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ ЗА ДАНИМИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ

У статті запропоновано метод неперервного контролю цілісності лінійної частини магістральних газопроводів на основі даних моніторингу значень тиску і температури газу на входах і виходах усіх вузлових елементів, а також швидкості потоку газу на вході першого вузлового елемента. Метод базується на алгоритмі оброблення даних моніторингу, який дає змогу визначити цілісність усіх елементів із використанням отриманих раніше інтегральних критеріїв. Реалізація методу передбачає створення системи моніторингу, яка містить вузлові пункти автоматичного відбору даних, канали передавання даних, бази даних оперативної інформації.

Ключові слова: магістральний газопровід, лінійні та вузлові елементи, моніторинг параметрів потоків, контроль цілісності.

Постановка проблеми. Магістральні газопроводи (далі – МГ) є найбільш ефективним засобом транспортування природного газу на великі відстані. Їхня висока ефективність досягається, зокрема, застосуванням труб великого діаметру та підтриманням високого тиску газу в магістралі за допомогою компресорних станцій (далі – КС).

За тривалої експлуатації надійність технологічних об'єктів газотранспортної системи (далі – ГТС) неминуче знижується. Водночас зростають ризики неконтрольованої розгерметизації об'єктів лінійної частини (ЛЧ) МГ, а отже, і вартість економічних втрат, екологічних та соціальних наслідків від можливих аварій. Технічне обслуговування та планові відновлювальні ремонти дають змогу підтримувати надійність об'єктів ГТС у певних межах. Проте в системі можуть виникати неочікувані події, які створюють загрози порушення цілісності та герметичності об'єктів ГТС. Застосування методів технічної діагностики дає змогу передбачати такі події чи виявляти їх на початкових стадіях, щоб мінімізувати їхні наслідки.

Сучасні підходи до організації безпечної експлуатації газотранспортних систем передбачають відхід від періодичної сертифікації технологічних об'єктів ГТС на користь неперервного управління їхнім технічним станом і цілісністю. З цієї метою

створюють системи управління цілісністю трубопроводів (англ. Pipeline Integrity Management Systems – PIMS) [1]. Ключовими функціями цих систем є діагностика технічного стану об'єктів, виявлення загроз порушення їхньої цілісності, оцінювання ризиків, планування, розроблення та реалізація заходів для запобігання подій, пов'язаних зі порушенням цілісності технологічних об'єктів [1; 2]. Всі ці проблеми повною мірою стосуються ГТС України. Тому актуальною є проблема розроблення методології неперервного контролю цілісності МГ із метою забезпечення безпечної експлуатації газотранспортної системи відповідно до нормативних документів [3–5].

Відомі різні методи контролю цілісності МГ, які використовують ті чи інші інформативні ознаки [6]. Серед них можна виокремити, зокрема, методи, які базуються на виявленні витоків [7]. Огляд цих методів поданий, зокрема, у статті «A survey on gas leak detection and localization techniques» [8]. Особливе місце серед цих методів посідають методи моделювання газодинамічних процесів у реальному часі (англ. Real Time Transient Modeling – RTTM) [7]. Як вхідні дані тут використовують значення параметрів газового потоку у трубопроводі (тиску, температури, швидкості потоку чи витрати), виміряні у певній

множині точок вздовж його траси. Основним компонентом у системах виявлення витоків, які реалізують такий підхід, є програмне забезпечення, призначене для відбору даних і розв'язування відповідних прямих і обернених задач газової динаміки. Тому їх слід зарахувати до так званих SIS-систем (англ. Software Intensive Systems). Розробленню математичних моделей, методів, алгоритмів і принципів побудови систем виявлення витоків із використанням RTTM присвячено багато публікацій [9–11].

У статті «Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу» [6], з огляду на систему рівнянь моделі газової динаміки та з використанням чисельних розв'язків крайових задач, сформульованих у рамках цієї моделі, побудовано функціонали для лінійних і вузлових елементів, які в інтегральній формі визначають відхилення від законів збереження маси та імпульсу газу в елементі. Функціонали залежать від функцій, які визначають зміну в часі параметрів газових потоків на вході та виході відповідних елементів. Із використанням отриманих функціоналів сформульовані критерії цілісності лінійних і вузлових елементів.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення з використанням критеріїв, запропонованих у статті «Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу» [6], методики неперервного контролю цілісності лінійної частини МГ на основі даних моніторингу параметрів газових потоків у трубопроводах.

Алгоритм неперервного контролю цілісності МГ. Згідно з моделлю структури МГ, запропонованою у статті «Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу» [6], розглядатимемо ЛЧ МГ як послідовність $[S_\lambda : \lambda = 1, 2, \dots, N]$ секцій S_λ (відрізків МГ між двома КС), де N – кількість секцій у МГ. Кожна секція S_λ , своєю чергою, являє собою послідовність послідовно з'єднаних вузлових $NE_{\lambda,j}$, $j = 1, 2, \dots, N_\lambda + 1$ і лінійних $LE_{\lambda,i}$, $i = 1, 2, \dots, N_\lambda$, де N_λ – кількість лінійних елементів у секції. Перший $NE_{\lambda,1}$ й останній $NE_{\lambda,N_\lambda+1}$ у цій послідовності є вузлами підключення до КС.

У моделі структури МГ лінійні елементи $LE_{\lambda,i}$ представляють довгі відрізки труб. Кожен елемент $LE_{\lambda,i}$, за згаданою вище статтею [6], характеризується певними властивостями – сукупностями геометричних $GL_{\lambda,i}$ і фізичних $PhL_{\lambda,i}$ параметрів математичної моделі руху газу через лінійний еле-

мент. Ця модель містить диференціальні рівняння з частинними похідними, залежними від часової t і просторової x координат. Отримані в рамках цієї моделі функціонали і критерії цілісності елементів $LE_{\lambda,i}$ також залежать від параметрів $GL_{\lambda,i}$ та $PhL_{\lambda,i}$.

Натомість вузлові елементи $NE_{\lambda,j}$ представляють у цій моделі складники малої протяжності – кранові вузли, вузли підключення до КС і підземних сховищ газу, труби-перемички, газомірювальні блоки, пункти редукування газу тощо. Вони, як і лінійні елементи, характеризуються множинами геометричних $GN_{\lambda,j}$ і фізичних $PhN_{\lambda,j}$ параметрів математичної моделі руху газу через вузловий елемент $NE_{\lambda,j}$. Ця модель містить звичайні диференціальні рівняння, залежні лише від часової змінної [6]. Отримані в рамках цієї моделі критерії цілісності елементів $NE_{\lambda,j}$ також залежать від параметрів $GN_{\lambda,j}$ та $PhN_{\lambda,j}$.

За моделлю структури МГ, контроль цілісності ЛЧ зводиться до контролю цілісності усіх вузлових і лінійних елементів усіх секцій: ЛЧ МГ є цілісною, якщо усі секції $\{S_\lambda \forall \lambda = 1, 2, \dots, N\}$ у його складі є цілісними, а будь-яка секція S_λ цілісна, якщо усі вузлові $\{NE_{\lambda,j} \forall j = 1, 2, \dots, N_\lambda + 1\}$ і усі лінійні $\{LE_{\lambda,i} \forall i = 1, 2, \dots, N_\lambda\}$ елементи цієї секції цілісні. Тож процес контролю цілісності МГ містить вкладені ітераційні процеси контролю цілісності секцій, а ці, своєю чергою, – процеси контролю цілісності вузлових і лінійних елементів (рис. 1).

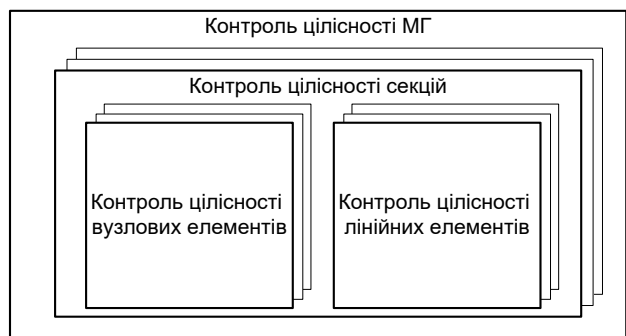


Рис. 1. Процес контролю цілісності МГ

За ознаку цілісності вузлових і лінійних елементів приймемо змінні $IN_{\lambda,i}$ і $IL_{\lambda,i}$, які набувають значень 1 або 0

$$IN_{\lambda,i} = \begin{cases} 1 & \text{if } NE_{\lambda,i} \text{ is integral} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad IL_{\lambda,i} = \begin{cases} 1 & \text{if } LE_{\lambda,i} \text{ is integral} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

залежно від того, чи відповідні вузлові і лінійні елементи задовольняють їхні умови цілісності [6].

Змінна IS_λ визначає стан цілісності секції S_λ : вона набуває значення 1, коли всі вузлові і всі

лінійні елементи в секції задовольняють їхні критерії цілісності, і значення 0, коли хоча б одна із цих двох груп елементів не задовольняє його критерій цілісності. Значення цієї змінної можна обчислити, зокрема, так

$$IS_{\lambda} = \prod_{i=1}^{N_{\lambda}} IL_{\lambda,i} \cdot \prod_{i=1}^{N_{\lambda}+1} IN_{\lambda,i}. \quad (2)$$

З метою забезпечення неперервності контролю процес контролю цілісності ЛЧ МГ «Main» (рис. 2) організований як нескінченний цикл. Блок «Section» у цьому процесі позначає алгоритм контролю цілісності секції, блок-схема якого показана на рис. 3. Модуль «Section» – це алгоритм, який визначає значення змінної IS_{λ} , що є ознакою цілісності секції λ , а також обчислює списки вузлових $[NE_{\lambda,i}]_{broken}$ і лінійних $[LE_{\lambda,i}]_{broken}$ елементів, які не задовольняють їхні критерії цілісності [6]. Цей алгоритм за необхідності може повертати також значення інтенсивності витoku для усіх елементів зі списків $[NE_{\lambda,i}]_{broken}$ та $[LE_{\lambda,i}]_{broken}$. Блок «Calculation of $[S_{\lambda}]_{broken}$ » в алгоритмі «Main» формує список секцій $[S_{\lambda}]_{broken}$, для яких не виконується критерій цілісності. Для цього використовуються змінні $IN_{\lambda,i}$ та $IL_{\lambda,i}$. Змінна логічного типу IM є ознакою цілісності МГ:

$$IM = \begin{cases} 1 & IS_{\lambda} = 1 \forall \lambda = 1, 2, \dots, N \\ 0 & \text{otherway} \end{cases}. \quad (3)$$

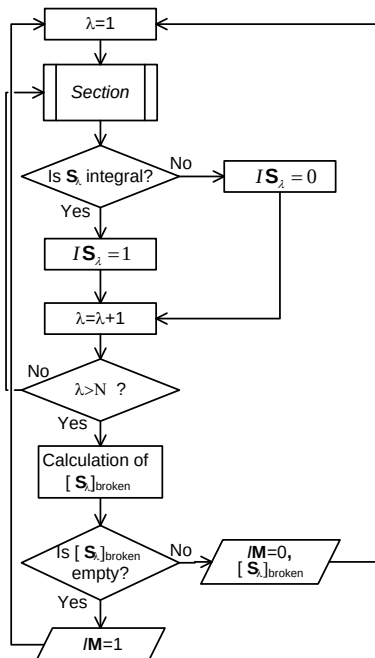


Рис. 2. Блок-схема алгоритму Main контролю цілісності МГ

За критеріями цілісності вузлових і лінійних елементів [6], для контролю цілісності будь-якого елемента необхідні дані про значення температури

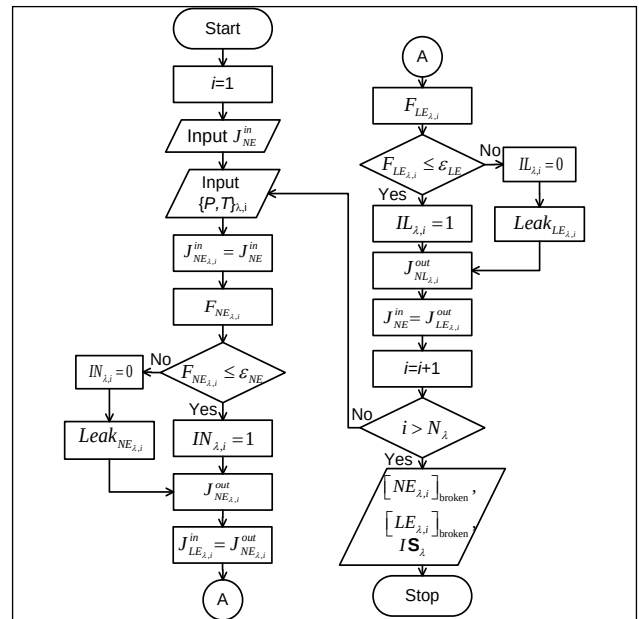


Рис. 3. Блок-схема алгоритму Section контролю цілісності секції МГ

T та тиску P на його вході (in) і виході (out), а також значення густини масового потоку J на його вході. Оскільки вихід вузлового елемента i -тої ділянки є одночасно входом її лінійного елемента, а його вихід є входом вузлового елемента наступної ($i+1$)-шої ділянки, то виконуються умови:

$$\begin{aligned} P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t) &= P_{NE_{\lambda,i}}^{out}(t), \quad P_{LE_{\lambda,i}}^{out}(t) = P_{NE_{\lambda,i+1}}^{in}(t), \\ T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t) &= T_{NE_{\lambda,i}}^{out}(t), \quad T_{LE_{\lambda,i}}^{out}(t) = T_{NE_{\lambda,i+1}}^{in}(t), \\ J_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t) &= J_{NE_{\lambda,i}}^{out}(t), \quad J_{LE_{\lambda,i}}^{out}(t) = J_{NE_{\lambda,i+1}}^{in}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Тож, щоб визначити значення тиску і температури газу на входах усіх елементів секції, достатньо ввести в алгоритм «Section» результати вимірювань цих параметрів лише на входах і виходах усіх вузлових елементів (блок «Input $\{P, T\}_{\lambda,i}$ »). Проте цих даних буде недостатньо, щоб реалізувати алгоритм контролю цілісності вузлових і лінійних елементів, необхідно задати також густини потоків маси $J_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t)$ і $J_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t)$ на їхніх входах. Із цією метою в алгоритм передається значення масового потоку на вході першого вузлового елемента (змінна $J_{NE}^{in} = J_{NE_{\lambda,1}}^{in}$). Для визначення $J_{NE_{\lambda,1}}^{in}$ можна виміряти значення швидкості $V_{NT_{\lambda,1}}^{in}$ і, використовуючи дані вимірювань тиску $P_{NE_{\lambda,1}}^{in}$ та температури $T_{NE_{\lambda,1}}^{in}$, обчислити за рівнянням стану газу [6] густину маси $\rho_{NE_{\lambda,1}}^{in}$ на вході першого елемента, а отже, знайти густину масового потоку $J_{NE_{\lambda,1}}^{in} = \rho_{NE_{\lambda,1}}^{in} V_{NT_{\lambda,1}}^{in}$.

Тепер отриманих даних

$$\{J_{NE}^{in}(t), P^{in}, T^{in}, P^{out}, T^{out}\}_{NE_{\lambda,1}}$$

вистачає, щоб обчислити функціонал $F_{NE_{\lambda,1}}$ для першого вузлового елемента і перевірити вико-

нання критерію його цілісності $F_{NE_{\lambda,1}} \leq \varepsilon_{NE}$. Отже, використовуючи математичну модель руху газу через вузловий елемент [6], можна визначити інтенсивність витоку $Leak_{NE_{\lambda,1}}$ (якщо його цілісність порушена) й обчислити густину масового потоку $J_{NE_{\lambda,1}}^{out}(t)$ на виході цього вузлового елемента. Так буде встановлено масовий потік на вході лінійного елемента цієї ділянки $J_{LE_{\lambda,1}}^{in}(t) = J_{NE_{\lambda,1}}^{out}(t)$. Тепер, використовуючи дані $\{J_{NE}^{in}(t), P^{in}, T^{in}, P^{out}, T^{out}\}_{LE_{\lambda,1}}$ для лінійного елемента, можна розрахувати для нього значення функціоналу $F_{LE_{\lambda,1}}$ і перевірити виконання критерію цілісності $F_{LE_{\lambda,1}} \leq \varepsilon_{LE_{\lambda,1}}$. Таким чином, використовуючи математичну модель руху газу через лінійний елемент [6], можна визначити інтенсивність витоку $Leak_{LE_{\lambda,1}}$ (якщо його цілісність порушена) й обчислити густину масового потоку $J_{LE_{\lambda,1}}^{out}(t)$ на виході цього вузлового елемента. Блок « $J_{NE}^{in}(t) = J_{LE_{\lambda,1}}^{out}(t)$ » приписує розраховане значення потоку змінній $J_{NE}^{in}(t)$. В наступному циклі петлі, керованої блоком умовного переходу « $i > N_{\lambda}$ », ця змінна визначає вхідний потік маси $J_{NE_{\lambda,i+1}}^{in}(t)$ вузлового елемента наступної ділянки (блок « $J_{NE_{\lambda,i+1}}^{in} = J_{NE}^{in}$ »). Ітераційний процес продовжується аж до виконання умови $i > N_{\lambda}$. Після цього алгоритм «Section» обчислює та повертає списки вузлових $[NE_{\lambda,i}]_{broken}$ та лінійних $[LE_{\lambda,i}]_{broken}$ елементів, для яких не задовольняються критерії цілісності, а також значення змінної IS_{λ} , яка є ознакою цілісності секції S_{λ} .

Схема відбору даних. Згідно з Правилами [5] (п. 18.3.г), на «ЛЧ МГ виконується контроль та вимірювання параметрів (моніторинг) у режимі реального часу за допомогою стаціонарно встановлених датчиків». На рис. 4 показана схема відбору даних на гіпотетичній секції S_{λ} МГ між компресорними станціями CS_{λ} і $CS_{\lambda+1}$.

Секція складається із N_{λ} лінійних і $N_{\lambda} + 1$ вузлових елементів. На вході і виході кожного вузлового елемента $NE_{\lambda,i}$, $i = 1, 2, \dots, N_{\lambda}$ із визначеним періодом τ_{inst} автоматично вимірюються миттєві значення тиску P і температури T газу. Якщо значення витрати газу на виході із компресорної станції CS_{λ} невідоме (відсутні штатні засоби вимірювання витрати), то на вході першого вузло-

вого елемента $NE_{\lambda,1}$ додатково вимірюються значення швидкості руху газу V в трубі. Це можна реалізувати, наприклад, із використанням накладних чи стаціонарних ультразвукових вимірювачів [12]. Як зазначалося, отримані дані щодо швидкості, тиску та температури газу на вході першого вузлового елемента дають змогу розраховувати густину масового потоку у цій точці (змінна J_{NE}^{in}), а отже, розпочати ітераційний процес контролю цілісності вузлових і лінійних елементів, починаючи від $NE_{\lambda,1}$ і закінчуючи $NE_{\lambda,N_{\lambda}+1}$. Якщо вимірювання швидкості V газу проводити також і на виході останнього вузлового елемента $NE_{\lambda,N_{\lambda}+1}$, то це дозволить реалізувати алгоритм «Section» у зворотному напрямі – від $NE_{\lambda,N_{\lambda}+1}$ до $NE_{\lambda,1}$. Необхідність у вимірюванні значень швидкості газу на вході першого (виході останнього) вузлового елемента відпадає, якщо відомі дані щодо значень витрати у цих точках секції, визначені штатними засобами вимірювань, встановленими на ЛЧ МГ.

Результати вимірювань параметрів потоку на входах і виходах вузлових елементів у цифровому вигляді буферизуються на накопичувачах вузлових пунктів моніторингу параметрів потоків, встановлених безпосередньо на майданчиках вузлових елементів (наприклад, на майданчиках кранових вузлів), звідки передаються каналами зв'язку на пункт контролю цілісності секцій. Тут ці дані піддаються цифровій фільтрації з метою усунення шумів, а отже, накопичуються у відповідних базах даних, доступних для програмних систем контролю цілісності.

Організація обчислень. Метод контролю цілісності ЛЧ МГ, який тут розглядаємо, передбачає використання в критеріальних співвідношеннях [6] для вузлових і лінійних елементів значень відповідних функціоналів $F_{NE_{\lambda,i}}$ і $F_{LE_{\lambda,i}}$, обчислених на заданих часових проміжках. Обчислені значення функціоналів $F_{NE_{\lambda,i}}$ і $F_{LE_{\lambda,i}}$ залежать від значень масового потоку на входах усіх елементів, а також тиску і температури на їхніх входах і виходах, заданих як функції часу на проміжках $[t_1, t_2]$, для яких вони обчислюються:

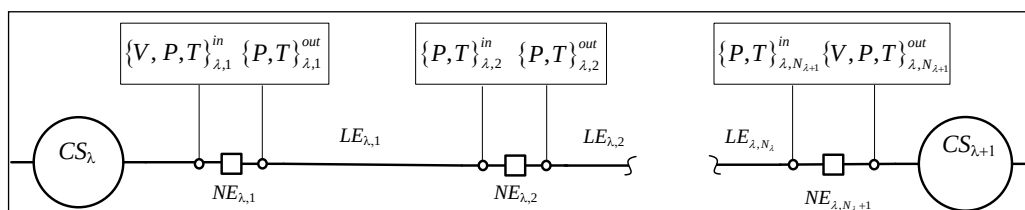


Рис. 4. Схема відбору даних на секції магістрального газопроводу

$$F_{NE_{\lambda,i}} = \int_{t_1}^{t_2} f_{NE} \left(J_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t) \right) dt, \quad (5)$$

$$F_{LE_{\lambda,i}} = \int_{t_1}^{t_2} f_{LE} \left(J_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t) \right) dt.$$

Тут f_{NE} та f_{LE} – підінтегральні функції для функціоналів вузлового та лінійного елементів.

Згідно з алгоритмом «Section», контроль цілісності вузових і лінійних елементів здійснюється послідовно, оскільки в обчисленнях, які виконуються для кожного наступного елемента, використовуються результати обчислень, виконаних для його попередника. Наприклад, для контролю цілісності лінійного елемента $LE_{\lambda,i}$ використовуються функція $J_{NE_{\lambda,i}}^{out}(t)$, розрахована для вузлового елемента $NE_{\lambda,i}$, а для контролю цілісності елемента $NE_{\lambda,i+1}$ використовується функція $J_{LE_{\lambda,i}}^{out}(t)$, обчислена для $LE_{\lambda,i}$. Тому, виконуючи послідовний контроль цілісності елементів секції, функціонали $F_{NE_{\lambda,i}}, i = 1, 2, \dots, N_{\lambda}$ та $F_{LE_{\lambda,i}}, i = 1, 2, \dots, N_{\lambda} + 1$ необхідно обчислювати на одному і тому ж часовому інтервалі (позначимо його тривалість τ_{sec}). Зазначимо, що від τ_{sec} залежить чутливість методу, тобто мінімальне значення витоків, яке можна виявити, використовуючи цей метод. Це пояснюється тим, що значення функціоналів (4) визначають два чинники – розбаланс маси (*leak*), який виникає на елементі за проміжок часу τ_{sec} , якщо він негерметичний, та похибки (*error*) вимірювань і обчислень:

$$F_{NE_{\lambda,i}} = \varepsilon_{NE_{\lambda,i}}^{leak} + \varepsilon_{NE_{\lambda,i}}^{error}, \quad F_{LE_{\lambda,i}} = \varepsilon_{LE_{\lambda,i}}^{leak} + \varepsilon_{LE_{\lambda,i}}^{error}$$

Тому за малих витоків, коли цей проміжок занадто малий, значення похибок $\varepsilon_{NE_{\lambda,i}}^{error}$ та $\varepsilon_{LE_{\lambda,i}}^{error}$ можуть значно переважати відповідні значення складників $\varepsilon_{NE_{\lambda,i}}^{leak}$ та $\varepsilon_{LE_{\lambda,i}}^{leak}$, зумовлених витоків. Збільшення інтервалу τ_{sec} підвищує чутливість, проте призводить до зниження швидкодії, тобто зростання проміжку часу, необхідного для виявлення розгерметизації секції.

Неперервність контролю секції досягається циклічним застосуванням алгоритму «Section» в алгоритмі «Main». На кожному циклі встановлюються ознаки цілісності усіх вузових і лінійних елементів і робиться висновок про цілісність усієї секції на послідовних проміжках часу тривалості τ_{sec} .

Робота алгоритму «Section» на кожному циклі розпочинається зі зчитування даних у пам'ять комп'ютера з бази даних моніторингу, починаючи від останнього (на момент t початку циклу) запису аж до запису, який відповідає моменту часу $t - \tau_{sec}$. На основі цих даних, отриманих за проміжок часу $[t - \tau_{sec}, t]$, алгоритм встановлює ознаки цілісності усіх елементів і секції загалом

для цього проміжку. Для цього він формує усі функції, необхідні для обчислення функціоналів (4). З цієї метою на основі отриманої множини вхідних даних, використовуючи методи інтерполяції та екстраполяції, створюється двовимірний масив $4 \cdot (N_{\lambda} + 1) + 1$, стовпчики якого відповідають параметрам $V_{NE_{\lambda,i}}^{in}, P_{NE_{\lambda,i}}^{in}, T_{NE_{\lambda,i}}^{in}, P_{NE_{\lambda,i}}^{in}, T_{NE_{\lambda,i}}^{in}, i = 1, 2, \dots, N_{\lambda} + 1$, а стрічки – моментам часу $t_k \in [t - \tau_{sec}, t]$. З використанням даних цього масиву, співвідношень (4), а також математичних моделей, які описують рух газу через вузлові та лінійні елементи, в процесі виконання алгоритму Section обчислюються функції

$$J_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), t \in [t - \tau_{sec}, t], \forall i = 1, 2, \dots, N_{\lambda} + 1, \quad (5)$$

$$J_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), t \in [t - \tau_{sec}, t], \forall i = 1, 2, \dots, N_{\lambda},$$

які необхідні для контролю цілісності вузових і лінійних елементів. Отже, послідовно виконуються обчислювальні процеси згідно з блок-схемою рис. 3.

Нехай τ_{alg} машинний час, необхідний для реалізації алгоритму Section у його застосуванні до оброблення даних, отриманих на проміжку часу τ_{sec} . Тож цикл, який розпочався у момент часу, завершиться у момент часу $t + \tau_{alg}$. Оскільки параметри потоку в МГ змінюються доволі повільно, то зазвичай $\tau_{alg} \ll \tau_{sec}$. Тому, щоб отримати цілком нові дані на наступний цикл, необхідна часова затримка τ_{delay} у роботі алгоритму тривалістю $\tau_{sec} - \tau_{alg}$. Однак, якщо вибрати тривалість τ_{delay} затримки, меншою від $\tau_{sec} - \tau_{alg}$, так, щоб задовольнялися умови $\tau_{alg} < \tau_{delay} < \tau_{sec} - \tau_{alg}$, то наступні цикли алгоритму «Section» будуть реалізуватися на вхідних даних, які частково перекриваються даними попередніх циклів (див. рис. 5).

На рис. 5 показана схема відбору даних для виконання алгоритму «Section» на різних циклах його роботи. Множини вхідних даних для різних циклів зображені заштрихованими прямокутними смужками. Розташування смужок на осі часу (Time) визначають часові періоди, на яких були отримані відповідні дані. Оскільки система моніторингу параметрів здійснює заміри параметрів потоку з фіксованою дискретністю, то об'єм вхідних даних на усіх циклах однаковий. Проте множини вхідних даних на різних циклах роботи алгоритму різні – вони відповідають різним часовим періодам:

$[t - c \cdot \tau_{sec} - (c - 1) \cdot \tau_{delay}, t - (c - 1) \cdot \tau_{sec} - (c - 1) \cdot \tau_{delay}]$
де c – номер циклу, t – момент початку першого циклу (для якого $c = 1$).

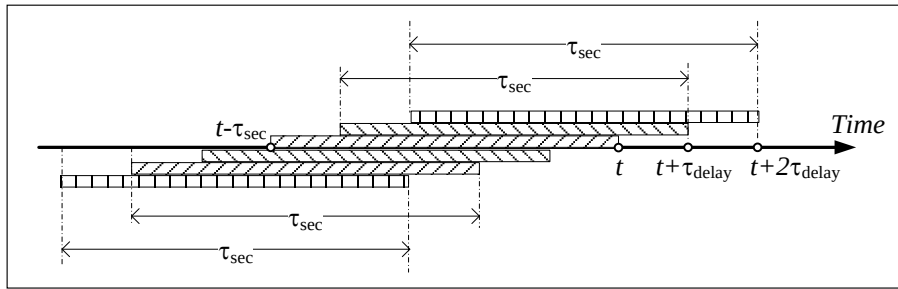


Рис. 5. Схема відбору вхідних даних для алгоритму «Section» на послідовних циклах його виконання

Така схема відбору вхідних даних для алгоритму «Section» дозволяє підвищити надійність системи контролю цілісності, оскільки отримані дані обробляються на кількох послідовних циклах роботи алгоритму. Змінюючи ці два параметри (τ_{sec} і τ_{delay}), можна налаштовувати систему неперервного контролю цілісності секції, залежно від режимів роботи МГ та технологічних потреб.

Висновки. Запропоновано метод неперервного контролю цілісності ЛЧ МГ на основі даних моніторингу значень тиску і температури газу на входах і виходах усіх вузлових елементів, а також швидкості потоку газу на вході першого вузлового елемента. Метод базується на алгоритмі оброблення даних моніторингу, який дає змогу визначити цілісність усіх елементів із використанням отриманих раніше інтегральних критеріїв.

Задля реалізації методу необхідно створити систему моніторингу параметрів потоків, яка складається із вузлових пунктів автоматичного відбору даних, підсистеми передавання даних і баз даних оперативної інформації. Вузлові пункти відбору даних можна облаштувати безпосередньо на майданчиках вузлових елементів (наприклад кранових вузлів) та оснастити їх відповідними пристроями для автоматичного вимірювання тиску і температури газу, які наявні на ринку вимірювального обладнання для газової промисловості в широкому асортименті. Задля вимірювання швидкості потоку можна використати наявні накладні чи стаціонарні ультразвукові вимірювачі.

Істотною перевагою методу є те, що його реалізація не вимагає втручання в технологічні процеси транспортування газу, реконструкції трубопроводів, проведення земляних робіт, екскавації тощо. Задля створення системи моніто-

рингу можна використати наявні вимірювальні засоби, лінії зв'язку, а також інтегрувати її в SCADA систему автоматизації ЛЧ.

Чутливість методу обмежується похибками вимірювання параметрів потоку (значень швидкості на вході першого вузлового елемента, тиску і температури газу на входах і виходах усіх вузлових елементів), а також похибками обчислень. Значення густини масового потоку на входах усіх вузлових і лінійних елементів, які необхідні для обчислення критеріальних функціоналів цих елементів, послідовно розраховуються з використанням математичних моделей руху газу через ці елементи. Це може спричинити накопичення похибок обчислень для елементів, розташованих наприкінці секції, і, як наслідок, до зниження чутливості методу для цих елементів.

Цей ефект можна знівелювати, якщо вимірювати швидкість потоку не тільки на вході першого вузлового елемента, але і на виході останнього. Тоді можна запускати два ітераційних процеси «Section»: один у прямому напрямі, як показано на рис. 3, а другий у зворотному – від $NE_{\lambda, N_{\lambda}+1}$ до $NE_{\lambda, 1}$, а рішення щодо цілісності секції приймати, з огляду на результати обчислень обох процесів. Щоб зменшити ефект накопичення похибок, необхідно також застосувати більш точну модель руху газу через вузловий елемент. Із цією метою варто врахувати в рівнянні балансу імпульсу для цього елемента силу інерції та локальний гідравлічний опір.

Щоб отримати кількісні оцінки чутливості і швидкодії методу, необхідно дослідити вплив неточності математичних моделей, похибок вимірювань і обчислень на значення критеріальних функціоналів, що вимагає окремого розгляду. Спеціального розгляду вимагає також проблема контролю цілісності технологічних об'єктів компресорних станцій.

Список літератури:

1. Mora R.G., Hopkins P., Cote E. I., Shie T. Pipeline Integrity Management Systems: A Practical Approach. US : ASME Press, 2016. 350 p.
2. Gabbar H.A. and Kishawy H.A. Framework of pipeline integrity management. *J. Process Systems Engineering*. 2011. Vol. 1, Nos. 3/4. P. 215–236.
3. Про об'єкти підвищеної небезпеки : Закон України від 18 січня 2001 р. № 2245-III / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14>.
4. Постанова Кабінету Міністрів України «Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки» / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/956-2002-п>.
5. Правила безпечної експлуатації магістральних газопроводів. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0292-10#o37>.
6. Чекурін В.Ф., Химко О.Я. Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. 30 (69). № 1 (ч. 1). С. 158–164.
7. Leak Detection Based Pipeline Integrity Systems. Guidance note. Glasgow: TUV NEL Ltd, 2010. 7 p.
8. Murvay P.-S., Silea I. A survey on gas leak detection and localization techniques. *Journal of Loss Prevention in the Process Industry*. 2012. № 25. Pp. 966–973.
9. Чекурін В., Химко О. Математичні моделі для ідентифікації витoku в довгому газопроводі. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2017. Вип. 25. С. 157–169.
10. Чекурін В., Химко О. Чисельне дослідження перехідних процесів у довгому газопроводі, спричинених розгерметизацією. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2017. Вип. 26. С. 100–111.
11. Чекурін В.Ф., Химко О.М. Моделювання системи виявлення та ідентифікації витоків у магістральних газопроводах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. Вип. 29 (68). № 1. С. 44–48.
12. Ultrasonic flowmeters. FUS-LDS Leak Detection System. Operating Instructions. August 2012. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/989/23909989/att_99750/v1/FUS-LDS_manual_EN_A5E03687684-02.pdf.

МЕТОД КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА

В статье предложен метод непрерывного контроля целостности линейной части магистральных газопроводов на основе данных мониторинга значений давления и температуры газа на входах и выходах всех узловых элементов, а также скорости потока газа на входе первого узлового элемента. Метод основан на алгоритме обработки данных мониторинга, который позволяет определить целостность всех элементов с использованием полученных ранее интегральных критериев. Реализация метода предусматривает создание системы мониторинга, которая содержит узловые пункты автоматического отбора данных, каналы передачи данных, базы данных оперативной информации.

Ключевые слова: магистральный газопровод, линейные и узловые элементы, мониторинг параметров потоков, контроль целостности.

A METHOD FOR INTEGRITY INSPECTION OF LINEAR PART OF MAIN GAS PIPELINE WITH THE USE OF DATA OF THE FLOW PARAMETERS MONITORING

A method for continuous integrity inspection of linear part of main gas pipeline has been considered in the paper. Operation of the method is based on monitoring of pressure and temperature on the inflows and outflows of all nodal elements, such as block valve station, of the pipeline section between two compressor stations. The value of the gas velocity at the inflow of the first nodal element is to be also monitored for that. An algorithm for processing of the monitoring data and inspection on this basis, with the use of the previously obtained integral criteria, of the integrity of all technological objects of the section has been developed. To implement the method the monitoring system, containing nodal stations for automatic data collection, channels for data transmission and operational data bases should be created. The system can be integrated into the SCADA-system of automation of pipeline's linear part.

Key words: main gas pipeline, linear and nodal elements, monitoring of flow parameters, integrity control.