

Сертифікація, стандартизація, якість

УДК 621.643.002

КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ БУДІВНИЦТВА МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ ТА НАДІЙНІСТЬ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Р.Т.Мартинюк, В.Я.Грудз, А.З.Багнюк

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

Рассмотрен метод прогнозирования надежности магистрального трубопровода как исследуемого объекта. Сделан вывод критерия качества строительства и эксплуатационной способности трубопровода с целью максимально возможного определения надежности системы.

It was examined the method of prognostication of pipelines reliability as of explored object. It was inferred conclusion of criterion of building quality and exploitation capability of pipeline with the aim of maximum possible determination of systems reliability.

Прогнозування надійності лінійної частини є невід'ємною частиною загальної проблеми управління якістю магістральних трубопроводів. З позицій трубопровідного будівництва один з найперспективніших напрямів прогнозування — це визначення кількісних показників надійності трубопроводу за даними контролю якості його будівництва.

Прогнозування надійності як процес науково обґрунтованого прогнозу конструктивно-технологічних і експлуатаційних властивостей конструкції спирається на конкретні критерії якості, вибір яких залежить від призначення цієї конструкції і вимог, що висуваються до неї.

Критерії якості повинні задовольняти ряд загальних вимог, з яких доцільно виділити такі:

- а) достатня чутливість стосовно параметрів якості, що відповідають даному критерію;
- б) необхідна конструктивність, що дає змогу порівняно просто визначати числове значення критерію;
- в) достатня універсальність з погляду можливості порівняння ефективності і якості спорудження трубопровідної конструкції.

З точки зору виведення конкретних рішень заходи в рамках галузевої системи управління якістю критерії і параметри якості лінійного будівництва трубопроводів доцільно класифікувати за видами виконання робіт:

- роботи підготовчого періоду;
- земляні роботи;
- зварювально-монтажні роботи;
- ізоляційно-укладальні роботи;
- роботи щодо електрохімічного захисту;

спеціальні роботи (баластування, рекультивація, підводно-технічні та ін.).

Номинальні значення параметрів якості, а також їх відхилення, що допускаються, регламентуються нормативно-технічними документами. У випадку, коли регламентована норма на конкретний параметр вступає в суперечність з тим або іншим критерієм якості (не задовольняє вимогам), виникає необхідність в перегляді такої норми, її уточненні, коректуванні.

Практичний інтерес має прогнозування надійності трубопроводу з позицій: 1) прогнозування моменту настання відмови трубопроводу; 2) прогнозування настання такого стану трубопроводу, котрий характеризується цілком конкретними значеннями параметрів його якості.

Відмова як подія, що полягає в порушенні працездатності об'єкта, є умовним поняттям. Оскільки під працездатністю трубопроводу розуміють такий його стан, при якому він здатний виконувати задані функції, зберігаючи значення заданих параметрів в межах, встановлених нормативно-технічною документацією, то для конкретизації відмови трубопроводу повинні бути чітко визначені критерії відмови. Залежно від характеру завдань, що вирішуються щодо управління якістю, такі критерії можуть бути різними. Наприклад, з позицій загальної ефективності магістрального трубопровідного транспорту відмова може бути визначена як зниження рівня поставки продукту споживачам до визначених меж. Причому такі межі можуть бути регламентованими як за об'ємом продукту, так і за часом його надходження споживачам. При

розв'язанні індивідуальних задач з підвищення надійності лінійної частини трубопроводу як критерій відмови може бути прийнята місцева втрата трубопроводом герметичності в строго встановлених нормах.

Таким чином, недоцільно шукати абсолютний, універсальний критерій відмови магістрального трубопроводу, але для певного класу задач повинні бути однозначно визначені критерії відмов і вказані кількісні пропорції, виходячи з умови працездатності даної конструкції.

Напрацювання на відмову трубопроводу є кількісною мірою зниження значень параметрів якості ω_{ij} до граничного рівня, що характеризується порушенням працездатності трубопроводу. З цієї точки зору правомірно таке визначення відмови трубопроводу: це подія, що характеризується появою такої ситуації до моменту часу t_i , при якій подальша експлуатація трубопроводу із значеннями параметрів якості ω_{ij} в момент t_i стає неможливою.

В методах ретроспективного прогнозування надійності лінійна частина трубопроводу розглядається у вигляді моделі послідовно сполучених елементів двох типів (труба і зварний стик) з різними характеристиками надійності. Відмова будь-якого з цих елементів приймається рівнозначною відмові всієї лінійної частини, а надійність трубопроводу в цілому описується композицією розподілу показників безвідмовності труб і зварних стиків. У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи трубопроводу в інтервалі часу $(0, t)$

$$P(t) = P_1^n(t)P_2^{n-1}(t), \quad (1)$$

а інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = n\lambda_1(t) + (n-1)\lambda_2(t), \quad (2)$$

де: $P_1(t), P_2(t)$ — відповідно ймовірності безвідмовної роботи труб і зварних з'єднань; n — число труб.

Проте даний метод прогнозування надійності трубопроводу є надзвичайно ідеалізованим, оскільки:

а) ґрунтується на умові невідновлюваності конструктивних елементів трубопроводу;

б) виходить з принципу незалежності розвитку відмов;

в) виводиться з припущенням однакової міцності та надійності однотипних елементів;

г) не враховує як аргументи робочі характеристики і параметри якості будівництва трубопроводу.

Якщо припустити, що ресурс елементів трубопроводу (зокрема труб і зварних з'єднань) описується законами «старіння» (Вейбулла, нормальним, логарифмічно нормальним та ін.), тоді для двоелементної моделі трубопроводу з вейбуллівськими розподілами напрацювання:

для труб

$$P_1(t) = e^{-(t/t_{01})^{m_1}}, \quad (1)$$

для зварних з'єднань

$$P_2(t) = e^{-(t/t_{02})^{m_2}}. \quad (2)$$

розподіл напрацювання до першої відмови трубопроводу на інтервалі $[0, (t_{01}, t_{02})]$ також підкоряється закону Вейбулла

$$P(t) = e^{-(t/t_0)^m}, \quad (3)$$

де

$$m = m_1 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\rho^{m_1}}{1+\rho^{m_1}} + \frac{\rho^{m_2}}{1+\rho^{m_2}} \right) \right\} \frac{1}{m_2 \left(\frac{1}{1+\rho^{m_1}} + \frac{1}{1+\rho^{m_2}} \right)} \right\} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \cdot (4)$$

$$t_0 = \left(\frac{1}{\frac{1}{t_{01}^{m_1}} + \frac{1}{t_{02}^{m_2}}} \right)^{\frac{1}{m}}; \quad \rho = \frac{t_{02}}{t_{01}}$$

Розв'язок задачі за формулами (3), (4) може бути отриманий при використанні методу статистичного моделювання, який дає змогу для різних законів розподілу і будь-якого числа елементів одержувати розв'язок в числовому вигляді, зручному для практичного застосування.

Якщо як початкові параметри прогнозу надійності трубопроводу використовувати функціональні характеристики зміни рівня дефектності в конструктивних елементах трубопроводу $\Omega(D) = f(t)$ і вірогідності настання відмови $P(t)$, то, аналізуючи співвідношення між такими характеристиками для конкретного тимчасового інтервалу, можна виразити оптимальні пропорції між $\Omega(D)$ і $P(t)$ за умовою

$$t_{opt} \rightarrow opt[\Omega(D)/P(t)].$$

При переході від окремих, одиничних параметрів якості до їх сукупності для трубопроводу загалом

$$\Omega(D) \rightarrow \Omega \left(\sum_{i=1}^n d_i \right), \quad \Omega(\omega_{ij}) \rightarrow \Omega \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \right)$$

отримуємо взаємозумовлену систему характеристик $\Omega(D) = f_1(t)$, $P = f_2(t)$. Тоді індивідуальні розв'язки системи рівнянь (5)

$$\left. \begin{array}{l} \Omega(d_1, t) = P_1(t) \\ \Omega(d_2, t) = P_2(t) \\ \dots\dots\dots \\ \Omega(d_i, t) = P_i(t) \\ \dots\dots\dots \\ \Omega(d_n, t) = P_n(t) \end{array} \right\}, \quad (5)$$

визначають n -ту сукупність точок (N_i) оптимальних співвідношень між характеристиками $\Omega(D)$, $P(t)$, трубопроводу, що створюють індивідуальну криву його оптимального ресурсу $\Phi[\Omega(D); P; t]$. В загальному випадку рішення задачі оптимального прогнозування сукупність оптимальних співвідношень вказаних характе-

ристик утворює деяку область оптимізації, всі точки якої мають конкретні функціональні зв'язки за умовою

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Omega(D)} \cdot \frac{\partial \Omega(D)}{dt} + \frac{\partial \Phi}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{dt} = 0. \quad (6)$$

Структурними одиницями об'єктної логічної схеми є комплексні показники якості, що оцінюють окремі елементи конструкції, а структурними одиницями параметричної логічної схеми — окремі значення одиничних показників якості.

Регламентована ймовірність формування трубопроводу із заданим рівнем якості відповідно до конкретної логічної схеми розраховується з використанням основних аксіом і теорем теорії ймовірності:

1) при послідовному з'єднанні двох структурних одиниць в логічній схемі регламентована ймовірність

$$P = P_1 P_2, \quad (7)$$

де P_1, P_2 — ймовірність отримання регламентованих одиничних оцінок, або ймовірність виконання фактичних показників якості з регламентованими значеннями;

2) при паралельному з'єднанні двох структурних одиниць в логічній схемі

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2); \quad (8)$$

3) при одній паралельній і двох послідовних структурних одиницях в схемі

$$P = 1 - (1 - P_1 P_2)(1 - P_3) \quad (9)$$

і так далі для будь-яких можливих комбінацій структурних одиниць в логічній схемі прогнозу надійності лінійної частини.

Як приклад здійснення прогнозування надійності лінійної частини трубопроводу за розробленою моделлю розглянемо ділянку, результати контролю якості якої подані за такими одиничними параметрами:

1) в процесі виконання земляних робіт:

відхилення осі траншеї від прямої на довжині $100D$ — $\omega_{2,1}$;

мінімальна глибина траншеї — $\omega_{2,2}$;

ширина траншеї по дну — $\omega_{2,3}$;

товщина шару крихкого ґрунту для вирівнювання — $\omega_{2,6}$

2) в процесі виконання зварювально-монтажних робіт:

глибина подряпин на стінці труби — $\omega_{3,2}$;

зсув кромки труб після фіксації — $\omega_{3,4}$;

зазор між кромками при стикуванні труб з товщиною стінки 8-10 мм при ручному зварюванні електродом УОНІ-13/55 — $\omega_{3,5}$;

підсилення шва — $\omega_{3,6}$;

глибина непровару — $\omega_{3,7}$;

3) в процесі виконання ізоляційних робіт:

якість очищення поверхні труб — $\omega_{4,1}$;

рівень осушення поверхні труб — $\omega_{4,2}$;

суцільність покриття — $\omega_{4,4}$;

товщина покриття — $\omega_{4,5}$;

4) в процесі виконання робіт з електрохімічного захисту:

мінімальний перехідний електроопір — $\omega_{5,1}$;

зсув різниці потенціалів «труба-земля» в кінці ділянки — $\omega_{5,2}$;

густина струму при катодній поляризації — $\omega_{5,4}$.

Таким чином, отримуємо систему проконтрольованих (фактичних) параметрів якості будівництва лінійної ділянки

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} = \begin{cases} \omega_{2,1}, \omega_{2,2}, \omega_{2,3}, \omega_{2,6}, \\ \omega_{3,2}, \omega_{3,4}, \omega_{3,5}, \omega_{3,6}, \omega_{3,7}, \\ \omega_{4,1}, \omega_{4,2}, \omega_{4,4}, \omega_{4,5}, \\ \omega_{5,1}, \omega_{5,2}, \omega_{5,4}, \end{cases} \quad (10)$$

яка утворює графік станів (рисунок 1) в номенклатурному полі одиничних показників якості лінійного будівництва.

Аналізуючи формальні зв'язки графіка станів, робимо висновок, що умовно-послідовно сполученими структурними одиницями логічної схеми прогнозу (за принципом максимуму критерію якості K_0) є такі одиничні параметри системи (10): $\omega_{2,2}, \omega_{3,2}, \omega_{3,7}, \omega_{4,1}, \omega_{4,4}, \omega_{5,2}, \omega_{5,4}$. Решта параметрів умовно-паралельні структурні одиниці $\omega_{2,1}, \omega_{2,3}, \omega_{2,6}, \omega_{3,4}, \omega_{3,5}, \omega_{3,6}, \omega_{4,2}, \omega_{4,5}$. Для складання логічної схеми прогнозу необхідно також проаналізувати взаємозв'язок між групами параметрів, що належать до технологічних операцій різних видів виконання робіт. За значенням технологічного процесу формування якості будівництва лінійної частини кожний подальший етап роботи залежить від результатів попередніх етапів, тобто загальний структурний взаємозв'язок параметрів в логічній системі має вигляд

$$\sum_{j=1}^n \omega_{1j} \rightarrow \sum_{j=1}^n \omega_{2j} \rightarrow \dots \rightarrow \sum_{j=1}^n \omega_{6j}.$$

Вірогідний рівень якості трубопроводу зумовлює відповідну ймовірність його безвідмовної роботи. Тому, розглядаючи ймовірність працездатного стану трубопроводу як деяку функцію початкового рівня його якості, можна побудувати математичну модель прогнозу надійності трубопроводу, виходячи з розглянутої логічної структури оцінки якості. Згідно з цією структурою ймовірність спорудження трубопроводу з рівнем якості, що відповідає графіку станів та оцінюється системою одиничних па-

раметрів якості $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}$, може бути записана

таким чином:

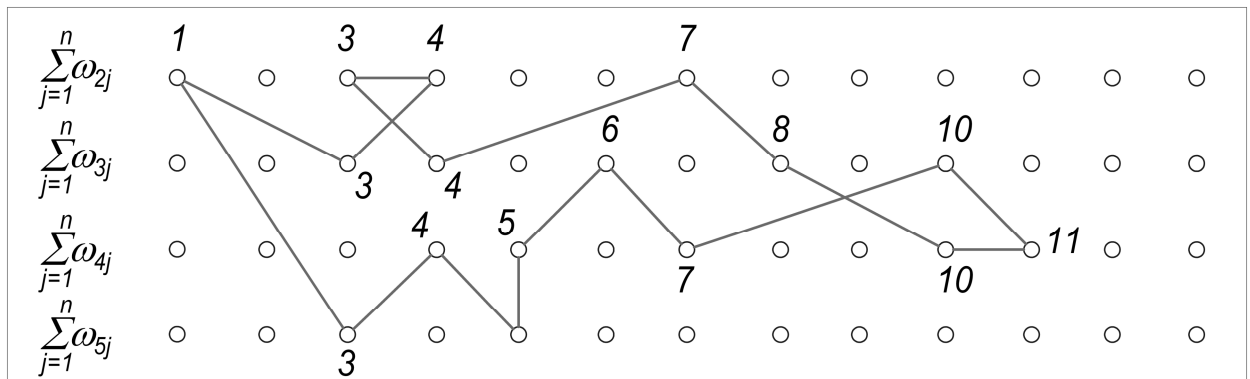


Рисунок 1 – Графік станів надійності лінійної частини магістрального трубопроводу

$$P = P_{2,2}P_{3,2}P_{5,4}[1 - (1 - P_{2,1})(1 - P_{2,3})(1 - P_{2,6})] \times \\ \times [1 - (1 - P_{3,2}P_{3,7})(1 - P_{3,4})(1 - P_{3,5})(1 - P_{3,6})] \times \\ \times [1 - (1 - P_{4,1}P_{4,4})(1 - P_{4,2})(1 - P_{4,5})(1 - P_{5,1})]. \quad (11)$$

Ймовірності P_{ij} , що входять у формулу (11), є компонентами вірогідної якості будівництва лінійної частини магістрального трубопроводу, котрі адекватно визначають і його вірогідну надійність, тобто:

$$P(K \leq K_0) \approx P(t \leq t_\alpha), \quad (12)$$

де: K_0 — регламентований рівень початкової якості (якості будівництва) лінійної частини; t_α — регламентований наробіток на відмову лінійної частини трубопроводу, що відповідає якості його будівництва K_0 .

Рівність (12) може мати тотожну форму тільки за умови ретельного вивчення механізму відповідності вірогідної якості будівництва трубопроводу з його вірогідною надійністю. Якісне визначення коефіцієнтів такої відповідності дасть можливість встановити достатньо точний аналітичний взаємозв'язок $P_{ij}(e) = \xi P(t)$; $0 < \xi \leq 1$.

Оцінка вірогідності P_{ij} здійснюється за калібрувальними характеристиками вірогідної якості $P(e)$, отриманими в процесі експериментальних досліджень розподілів фактичних значень показників якості e_{ij} . Калібрувальні характеристики, за якими оцінюються значення вірогідності P_{ij} в результаті контролю якості будівництва трубопроводу, задаються для двох напрямів прогнозування: випробування і експлуатації.

Основний прогнозований параметр експлуатаційної надійності трубопроводу — час його перебування в стані експлуатаційної спроможності. Він може виступати як міра взаємозв'язку конструктивно-технологічного потенціалу трубопроводу, з одного боку, і рівня експлуатаційного навантаження, з іншого. Якщо розглядати сукупність робочих параметрів трубопроводу, що формують рівень його початкової якості як кінцево-мірну функцію випад-

ково розподілених величин $\Phi_{\omega_{ij}} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \right)$, то, використовуючи теорему Колмогорова про кінцево-мірні розподіли, множині $\Phi_{\omega_{ij}}$ може бути поставлена у відповідність деяка міра ймовірності Φ_t (значення якої полягає в оцінці вірогідності тимчасових розподілів одиничних параметрів ω_{ij}). Для того, щоб ці заходи склали систему кінцево-мірних розподілів якої-небудь випадкової функції $\Phi_{\omega_{ij}}$, необхідно і достатньо узгодженості системи

$$\{\Phi_{t_1, t_2, \dots, t_n} \in T, n = 1, 2, \dots, i, \dots, n\}. \quad (13)$$

За теоремою продовження міри розподіл $\Phi_{\omega_{ij}}$ випадкової функції однозначно визначається кінцево-мірними розподілами $\Phi_{t_1}, \Phi_{t_2}, \dots, \Phi_{t_i}, \dots, \Phi_{t_n}$, при різних значеннях $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n \in T$. Враховуючи багатовимірність поля якості трубопроводу $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \in \Omega$, а також, використовуючи властивості відповідності на кінцево-вимірній множині у формі Колмогорова, отримуємо гауссівську випадкову функцію ω_t с $m(t) = M\omega_t$ як кореляційну функцію Φ_t одновимірних розподілів $\Phi_{\omega_{ij}}$. Узгодження розподілів впливає з того, що нормальний розподіл однозначно є математичним сподіванням і матрицею коваріацій, а також того, що розподіл будь-якого підвектора нормального вектора знову нормально.

Література

1. Молдаванов О.И. Качество сооружения магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1979. — 223 с.

2. Молдаванов О.И., Молдаванов И.И. Количественная оценка качества уплотнения трубопроводной арматуры. — М.: ВНИИЭ Газпром, 1973. — 241 с.