

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЬНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЗАХОДІВ НА ЛІНІЙНІЙ ЧАСТИНІ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ

I. I. Остапюк

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел (03422)42157,
e-mail: public@ifdtung.if.ua*

Розглядаються питання централізованого обслуговування лінійної частини магістрального газопроводу. Створено економо-математичну модель процесу, яка розглядається як функція питомих витрат на обслуговування. Оптимізація процесу обслуговування дає змогу скоротити витрати на обслуговування.

Ключові слова: надійність, магістральний газопровід, діагностування

Рассматриваются вопрос о централизованном обслуживании линейной части магистрального газопровода. Создана экономо-математическая модель процесса, которая рассматривается как функция удельных затрат на обслуживание. Оптимизация процесса обслуживания позволит сократить затраты на эксплуатацию.

Ключевые слова: надежность, магистральный газопровод, диагностика

Are examined question of the centralized maintenance of linear part of main gas pipeline. The ekonomo-mathematical model of process, which is examined as funktsiya specific expenses on service, is created. Optimization of process settles service to shorten expenses on exploitation.

Keywords: reliability, main gas pipeline, diagnosticating

Одним з найважливіших понять, що характеризує систему з точки зору забезпечення споживачів газом, є надійність. Загальновідомо, що показники занадійності залежать від терміну служби об'єкту. Для магістральних газопроводів юридично встановлено граничний ресурс експлуатації 33 роки, після закінчення якого необхідна реконструкція або капітальний ремонт для відновлення показників надійності.

Серед газотранспортних магістралей України 17.27% експлуатуються вже понад 33 роки, а 13.66% до вказаної граници залишилось менше 10 років. Отже, 30.33% газопроводів від загальної їх протяжності вимагають невідкладних заходів не тільки для підвищення експлуатаційної надійності, але й забезпечення живучості.

Слід відзначити, що експлуатаційними службами ведуться роботи з діагностування стану газопроводів різноманітними методами, в тому числі з застосуванням інтелектуальних поршнів. Останні показали, що на окремих ділянках стан лінійної частини газопроводів критичний. Корозійні процеси призвели до зменшення робочої товщини стінки труб до такої міри, що подальша експлуатація газопроводів під робочим тиском є життєво небезпечною.

В таких умовах одним з найважливіших питань удосконалювання системи технічного обслуговування і ремонту лінійної частини магістральних газопроводів є вибір раціональної стратегії обслуговування з метою подальшого оптимального планування контрольно-відновлювальних заходів.

При формуванні стратегії обслуговування і ремонту необхідно враховувати специфіку реального процесу експлуатації лінійної частини, а також вимоги діючих нормативних документів, що накладають серйозні обмеження на можливі варіанти розрахункових схем технічного обслуговування і ремонту.

За основу розрахункової схеми контрольно-відновлювальних заходів приймається двостадійна модель руйнування газопроводу, обговорена в попередньому параграфі. Стратегія формується у залежності від виду контролю, стану об'єктів, характеру ремонтно-експлуатаційних заходів і принципів впливу на систему за результатами контролю. Лінійна частина магістрального газопроводу (об'єкт) контрольно-відновлювального обслуговування може знаходитися в деякій

кінцевій кількості станів $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$. Випадковий процес еволюції станів системи в часі описується функціями $X(t)$ зі ступінчастими траєкторіями. Аналіз практики експлуатації лінійної частини системи газопроводів, вимоги діючих галузевих нормативних документів дозволяють сформулювати наступні можливі стани системи:

$$X(t) = \begin{cases} E_1 - \text{справний стан} \\ E_2 - \text{не справний стан, але можлива робота} \\ E_3 - \text{непрацездатний (відмова)} \\ E_4 - \text{ремонтно-відновлювальне обслуговування} \\ E_5 - \text{контроль} \end{cases}$$

Розрахункова схема контрольно-відновлювальних заходів (стратегії) формулюється в такий спосіб:

- на магістральному газопроводі здійснюються строго періодичні перевірки стану (герметичності) лінійної частини (з періодом δ);
- у випадку виявлення несправностей і ушкоджень (свищі, витоку і прирівняні до них стани) здійснюються невідкладні відбудовні роботи;
- у випадку відмовлення (самостійного прояву ушкодження) у міжоглядовий період проводяться невідкладні аварійно-відбудовні роботи.

Граф переходів станів системи у ході контрольно-відновлювальних заходів представлений на рисунку 1.

Будемо вважати, що відмова на лінійній частині виявляються практично миттєво й абсолютно вірогідно. Вірогідність контролю характеризується повною імовірністю виявлення ушкодження P за результатами перевірки. Прийmemo припущення, що заходи щодо технічного обслуговування і ремонту здійснюються практично миттєво (через непорівнянно менші витрати часу стосовно δ) і не відбуваються на рівні показників надійності газопроводу.

Метою раціонального планування заходів щодо обслуговування і ремонту лінійної частини магістрального газопроводу полягає в мінімізації функції мети сумарних питомих витрат з обліком усіх її складових при обраній стратегії контрольно-відновлювальних заходів :

$$\Phi(Z_{\Sigma}^V) \Rightarrow \min . \quad (1)$$

Така постановка задачі цілком традиційна [1]. Для її реалізації необхідно одержати інтегральний вираз функції мети (задача аналізу) і показників, її складових, а також знайти оптимальні (екстремальні) значення функції при різних вихідних даних і граничних умовах (задача синтезу). Головними принципами формалізації запропонованої математичної моделі є ймовірнісний підхід і облік фактора надійності лінійної частини магістрального газопроводу.

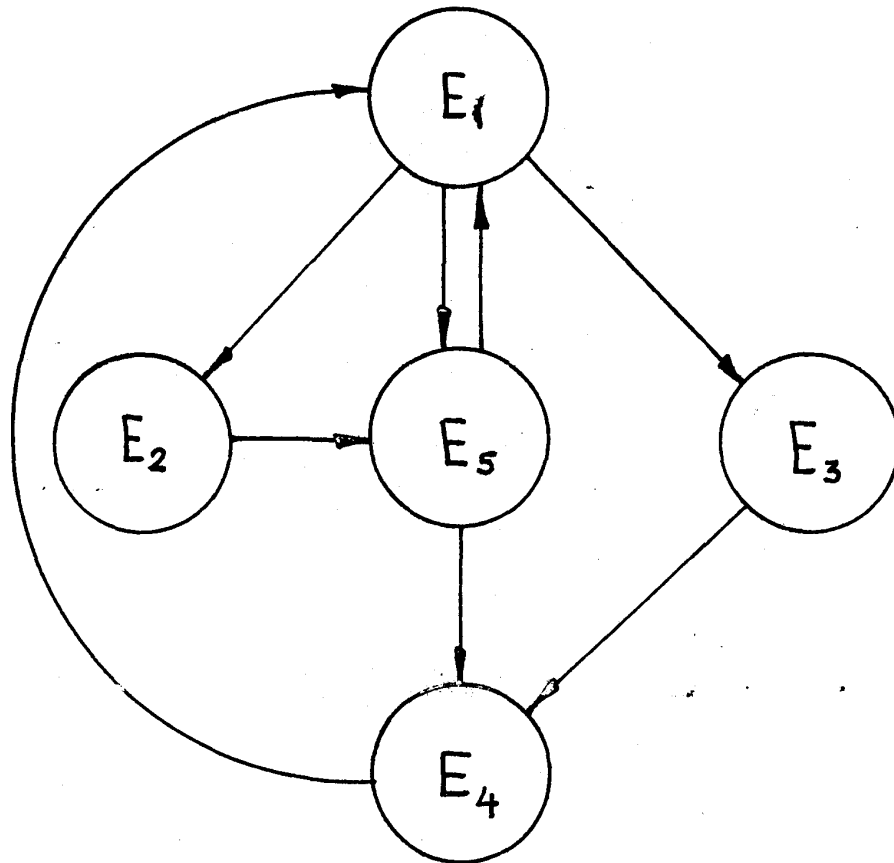
Пропонована розрахункова схема контрольно-відновлювальних заходів оцінюється наступним інтегральним показником:

$$Z_{\Sigma}^V = Z_{ав} \cdot \bar{n}_{ав} + Z_m \cdot \bar{n}_n + Z_{np} / \delta + \bar{Q} , \quad (2)$$

де $\bar{n}_{ав}, \bar{n}_n$ - узагальнені показники, що оцінюють відповідно середню питому інтенсивність усунення аварій і ушкоджень на ділянці, що обслуговується, 1/добу; \bar{Q} - узагальнений показник з оцінки питомого збитку від втрат газу грн/добу; $Z_{ав}, Z_n$ - показники ремонтпридатності лінійної частини, що оцінюють середні витрати (відповідно) на одну аварію, ушкодження.

З врахуванням обумовлених вище розрахункових схем руйнування й обслуговування лінійної частини вважаємо інтенсивність потоку відмовлень і ушкоджень λ постійною величиною, отже в випадку однопараметричного експонентного розподілу для характеристики безвідмовності системи можна обмежитися єдиним показником λ , 1/добу.

Процес розвитку ушкодження до його самостійного прояву (відмова) описується випадковим часом існування несправності з функцією розподілу $\Phi(t)$.



*E₁ - справний стан; E₂ - несправний працездатний;
E₃ - непрацездатний (відмова); E₄ - відновлення; E₅ - контроль*

Рисунок 1 - Граф переходів станів лінійної частини магістральних газопроводів у ході контрольно-відновлювальних заходів

Серед показників ремонтпридатності (крім $Z_{ав}$, Z_n) і ефективності обслуговування газотранспортної системи необхідно враховувати:

- витрати на контрольні заходи (періодичне патрулювання) - $Z_{пр}$;
- збиток від утрат газу при стравлюванні в ході ремонту C ;
- середня питома величина збитку від одного ушкодження (свища, витоку) - q ;
- імовірність виявлення ушкоджень за результатами перевірки - P ;
- періодичність контролю - δ , діб.

Розглянемо стаціонарний режим обслуговування необмеженої тривалості з періодичним контролем стану лінійної частини з частотою $1/\delta$ і дозволеною здатністю P .

Питоме число ушкоджень, виявлених за результатами перевірок які не проявилися самостійно, складає:

$$\pi_{II} = \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} P \bar{\Phi}(t) dt + \lambda \int_{\delta}^{\delta} P(1-P) \Phi(t) dt + \lambda \int_{2\delta}^{3\delta} P(1-P)^2 \Phi(t) dt + \dots \right] =$$

$$= \frac{1}{\delta} \lambda P \sum_{K=0}^{\infty} (1-P)^K \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} \bar{\Phi}(t) dt \quad (3)$$

де $\bar{\Phi}(t) = 1 - \Phi(t)$ - імовірність непереходу ушкоджень, що з'явилися, у відмовах за час t (функція надійності).

Відмова системи є результатом самостійного прояву ушкодження (несправності), що утворились у період між двома контрольними перевірками чи невиявленої під час попередніх контрольних оглядів.

Питоме число відмов (аварій) визначимо наступним чином:

$$\begin{aligned} \pi_{ab} &= \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} \Phi(t) dt + \lambda \int_{\delta}^{2\delta} (1-P) [\bar{\Phi}(t-\delta) - \bar{\Phi}(t)] dt + \right. \\ &+ \left. \lambda \int_{2\delta}^{3\delta} (1-P)^2 [\bar{\Phi}(t-2\delta) - \bar{\Phi}(t)] dt + \dots \right] = \\ &= \frac{1}{\delta} \lambda \int_0^{\delta} \Phi(t) dt + \frac{1}{\delta} \lambda \sum_{K=1}^{\infty} (1-P)^K \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} [\bar{\Phi}(t-\delta) - \bar{\Phi}(t)] dt \end{aligned} \quad (4)$$

Оцінку узагальненого показника питомого збитку від втрат газу в атмосферу доцільно провести в два етапи:

$$\bar{Q} = \bar{Q}_{ym} + \bar{Q}_{cmp}, \quad (5)$$

де \bar{Q}_{ym} - питомий збиток від утрат газу при несправностях (витоку, свищі); \bar{Q}_{cmp} - питомий збиток від стравлювання газу з ділянки при проведенні відновлювальних робіт.

Оцінити питомий збиток від втрат газу від моменту появи ушкодження (витоку) до його ліквідації (після виявлення) досить складно. Апаратура, що здатна фіксувати обсяги витоків через мікросвищі і роземні з'єднання, відсутня. Системи безупинного контролю за герметичністю трубопроводів поки перебувають у стадії дослідно-теоретичних розробок [1]. Статистичні методи неприйнятні через відсутність подібної інформації. Необхідно відмітити, що величина питомих втрат газу через свищі і витоки має дуже широкий діапазон. З визначеним ступенем точності середні питомі втрати q можна визначати за непрямыми даними у залежності від параметрів (режиму) перекачування, характеру і розмірів ушкодження. Тоді питомий збиток від втрат газу через ушкодження із середньою щодобовою втратою q визначимо:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{ym} &= \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} dt q \int_0^{\delta-t} \Phi(x) dx + \lambda \int_{\delta}^{2\delta} dt q \int_{t-\delta}^t (1-P) \bar{\Phi}(x) dx + \right. \\ &+ \left. \lambda \int_{2\delta}^{3\delta} dt q \int_{t-2\delta}^t (1-P)^2 \bar{\Phi}(x) dx + \dots \right] = \\ &= \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} dt q \int_0^{\delta-t} \bar{\Phi}(x) dx + \lambda q \sum_{K=1}^{\infty} (1-P)^K \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} dt \int_{t-\delta}^t \bar{\Phi}(x) dx \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Як правило, найбільша питома вага в загальному обсязі втрат газу в атмосферу складають втрати при стравлюванні газу з ділянки газопроводу, що ремонтується. Об'єм стравленого газу визначається характеристиками ділянки (довжина перекритої ділянки між двома лінійними кранами; діаметр газопроводу) і параметрами газу, що перекачується, (тиск, температура, коефіцієнт стисливості). Не складає труднощів визначити середні значення витрат (збитку) C від втрат газу при стравлюванні перед проведенням вогневих робіт на трасі.

З врахуванням цього, питомий збиток від стравлювання газу з ділянок газотранспортної системи, що обслуговується, складає:

$$\bar{Q}_{cmp} = \frac{C}{\delta} (1 - P_{не}), \quad (7)$$

де $P_{не}$ - повна імовірність невиявлення ушкоджень за результатами всіх перевірок у ході експлуатації лінійної частини.

$$\begin{aligned}
 P_{не} &= \prod_{\kappa=0}^{\infty} \prod_{t=0}^{\delta} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(\lambda dt)^r}{r!} e^{-\lambda dt} \left[1 - \overline{\Phi}((K+1)\delta - t)(1-P)^K P \right]^r = \\
 &= \prod_{\kappa=0}^{\infty} \prod_{t=0}^{\delta} \exp \left\{ -\lambda P (1-P)^K \overline{\Phi}((K+1)\delta - t) dt \right\} = \\
 &= \prod_{\kappa=0}^{\infty} \exp \left\{ -\lambda P (1-P)^K \int_0^{\delta} \overline{\Phi}((K+1)\delta - t) dt \right\} = \\
 &= \exp \left\{ -\lambda P \sum_{\kappa=0}^{\infty} (1-P)^K \int_{\kappa\delta}^{(\kappa+1)\delta} \overline{\Phi}(x) dx \right\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

З врахуванням (6) - (8) вираз (5) матиме вид:

$$\begin{aligned}
 \overline{Q} &= \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} dt q \int_0^{\delta-t} \overline{\Phi}(x) dx + \lambda q \sum_{\kappa=1}^{\infty} (1-P)^K \int_{\kappa\delta}^{(\kappa+1)\delta} dt \int_{t-\delta}^t \overline{\Phi}(x) dx + \right. \\
 &\left. + C \left(1 - \exp \left(-\lambda P \sum_{\kappa=0}^{\infty} (1-P)^K \int_{\kappa\delta}^{(\kappa+1)\delta} \overline{\Phi}(x) dx \right) \right) \right]
 \end{aligned} \tag{9}$$

Приймаючи обумовлене вище припущення про експоненціальний характер функції розподілу випадкового часу існування ушкодження до самостійного прояву (відмова), середній час існування ушкодження τ_{cp} визначимо як математичне очікування випадкового наробітку на відмову

$$\begin{aligned}
 \tau_{cp} &= M_{\xi} = \int_0^{\infty} t d\Phi(t) = \int_0^{\infty} \overline{\Phi}(t) dt = \\
 &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\alpha}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Зручніше записати:

$$\Phi(t) = 1 - \exp(-\alpha t), \tag{11}$$

де $\alpha = 1/\tau_{cp}$.

Опускаючи численні проміжні перетворення, з врахуванням (10), (11), одержимо вирази узагальнених показників (3), (4), (9) в остаточному виді:

$$\pi_n = \frac{\lambda P}{\alpha \delta} \cdot \frac{(1 - e^{-\alpha \delta})}{1 - (1-P)e^{-\lambda \delta}}; \tag{12}$$

$$\pi_{ав} = \lambda - \pi_n; \tag{13}$$

$$\overline{Q} = \left(C + \frac{q}{\alpha} \right) (\lambda - \pi_n) + \frac{C}{\delta} [1 - \exp(-\pi_n \delta)]. \tag{14}$$

Таким чином, функція мети середніх питомих сумарних витрат $\overline{Z}_{\Sigma}^{KB3}$ на здійснення контрольно-відновлювальних заходів у рамках обраної стратегії має вигляд:

$$Z_{\Sigma}^v = \frac{Z_{np} + C}{\delta} + \lambda \left(Z_{as} + \frac{q}{\alpha} \right) - \left(Z_{as} - Z_n + \frac{q}{\alpha} \right) \pi_n - \frac{C}{\delta} \exp(-\pi_n \delta), \quad (15)$$

де $\bar{\pi}_n$ - описується виразом (12).

Розроблена математична модель оцінки ефективності контрольно-відновлювальних заходів у рамках прийнятої стратегії технічного обслуговування і ремонту досить адекватно описує реальний процес обслуговування лінійної частини магістрального газопроводу і дозволяє вирішувати комплекс задач по його удосконалюванню.

Література

1. Грудз В.Я. Обслуживание газотранспортных систем. В.Я.Грудз, Д.Ф. Тымкив, Е.И. Яковлев. Киев: УМК ВО, 1991. - 160 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
10.06.12*

*Рекомендована до друку оргкомітетом
міжнародної науково-технічної конференції
“Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу”,
яка відбулася 15-18 травня 2012 р.*