УДК 621.64.029

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СТРАТЕГІЙ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ УСОБЛЕНОГО БЛОЧНО-КОМПЛЕКТНОГО ОБ'ЄКТУ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ

[1] Д.Є.Коновалов, [2] Д.Ф.Тимків

[1] ДК «Укргазвидобування» філія УБМР «Укргазспецбудмонтаж» СВБМР «Укргазспецбудмонтаж», 82423, Львівська обл., Стрийський р-н, с П'ятничани, вул. Промислова
e-mail: konovalov.ukr@gmail.com

[2] ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: informatik@nung.edu.ua

При оценке эффективности стратегий технического обслуживания блочно-комплектного объекта магистрального газопровода приведенная формула для нахождения оптимального числа проверок объекта и их периодичность, которая минимизирует затраты при условии обеспечения высокого коэффициента готовности. Приведенные решения в статье дают возможность решить задачу выбора оптимального режима обслуживания блочно-комплектного оборудования магистральных газопроводов.

With the estimation of the effectiveness of strategies of the maintenance of the block-complete object of main gas pipe the given formula for finding the optimum number of checkings of object and their periodicity, which minimizes the expenditures with the condition of guaranteeing of high to readiness factor. Given solutions in the article give the possibility to solve task to the selection of the optimum regime of servicing the block-complete equipment of main gas pipes.

При експлуатації газопроводів виникає значна кількість проблем, що пов'язані зі зниженням матеріальних затрат на їх функціонування, із забезпеченням їх надійної та безаварійної роботи, з мінімізацією негативного впливу на довкілля.

Насущні потреби експлуатації складних газотранспортних систем зумовили необхідність пошуку більш досконалих форм будівництва, експлуатації та ремонту лінійної частини магістральних газопроводів в умовах договірних відносин, фінансових труднощів за рахунок коригування існуючих форм і більш ретельного врахування специфічних умов експлуатації газотранспортної системи магістральних газопроводів.

Однією з таких форм є створення і використання різнотипного газотранспортного устаткування в блочному виконанні. Блочне виконання дозволяє розробити і впровадити в практику ремонтних робіт автоматизовані блочно-комплексні установки, в тому числі великої одиничної потужності, для комплексної підготовки газу і газового конденсату [1].

У стратегіях обслуговування блочно-комплектного обладнання (БКО) магістральних газопроводів, передбачається, що в системі (об'єкті), яка обслуговується розмежовуються три стани: А – функціонування в справному стані, В – функціонування в несправному (передвідмовному) стані, С – відмова (непрацездатний стан). Таким чином, виходячи з вищевикладеного, маємо таку розрахункову схему розвитку пошкодження в БКО або в будь-якій з його складових частин.

Розглянемо стратегію В (як найбільш загальну), її формування і оцінку ефективності для відокремленого блочно-комплектного об'єкта магістрального газопроводу.

Як визначальні параметри задамо наступні:

1) розподілення часу роботи в справному стані. Для його описання використовується одна з декількох, в рівній степені зручних функцій:

функція розподілення часу роботи в справному стані

$$F(t) = P\{\xi \le t\}, \qquad (1)$$

де ξ – випадкова тривалість роботи в справному стані;

густина імовірності

$$f(t) = \frac{dF}{dt}\ , \qquad (2)$$

2) розподілення часу роботи в передвідмовному стані:

функція розподілення часу роботи в несправному, тобто в передвідмовному стані

$$\Phi(t) = P\{\eta \le t\}\,. \qquad (3)$$

Принциповою умовою є допущення про незалежність тривалості станів, тобто

$$P\{\xi \le x; \eta \le y\} = F(x)\Phi(y)\ . \qquad (4)$$

Введемо необхідні позначення.

Для показників ремонтопридатності:

T_P – назначений ресурс (планове напрацювання);

t – час на обслуговування (або проведення операцій);

c – вартість обслуговування (або проведення операцій);

Для показників ефективності обслуговування:

$З_P$ – абсолютні середні затрати на обслуговування за період регенерації;

t_p – абсолютний середній час на обслуговування;

t_p – напрацювання до зняття (заміни).

Для введення в стратегію пробірок мається на увазі наступне:

– всього проводиться n перевірок, в момент T_P перевірка не проводиться;

– перевірки проводяться з періодичністю θ;

– змінами стану об'єкту під час роботи перевірки нехтуємо;

– проведення перевірок не впливає на надійність об'єкту обслуговування;

– кожна перевірка забезпечує абсолютну достовірність визначення пошкодження (передвідмовного стану).

Таким чином кількість перевірок:

$$n = \left[\frac{T_p}{\theta}\right] - 1 , \tag{5}$$

де θ – періодичність перевірок.

Для всіх показників приймемо загальні індекси подій:

пр. – перевірка;

пред. – попереджувальна заміна за результатами перевірки;

пл. пред. – попереджувальна заміна в момент T_P за умови передвідмовного стану;

пл. – заміна в момент T_P за умови справного стану;

ав. – аварійна заміна.

Виходячи зі схеми розвитку пошкодження для відокремленого блочно-комплектного об'єкту магістрального газопроводу отримано наступне вираження середніх сумарних затрат на обслуговування за період регенерації:

$$\begin{gathered}\overline{З}_P(\theta, T_P) = \sum_{\kappa=0}^{n-1} \int_{\kappa}^{(\kappa+1)\theta} dF(t) \times \\ \times \left\{ \kappa C_{пр} + \overline{\Phi} \times \left[(\kappa+1)\theta - t\right] \times \left[C_{пр} + C_{пред}\right] + \right. \\ \left. + \int_0^{(k+1)\theta - t} d\Phi(y)\left[C_{ав}\right] \right\} + \int_{n\theta}^{T_P} dF(t) \times \\ \times \left\{ nC_{пр} + \overline{\Phi}\left(T_P - t\right) \times C_{пл.пред} + \Phi\left(T_P - t\right) C_{ав} \right\} + \\ + \overline{F}\left(T_P\right)\left[C_{пл} + nC_{пр}\right] ,\end{gathered} \tag{6}$$

де: $\overline{\Phi} = (1 - \Phi)$ – функція надійності (доповнення до одиниці); Ф – функція надійності, то ж по $\overline{F(t)}$ і $F(t)$.

В загальному випадку час роботи до відмови є випадковою величиною, тому необхідно прийняти рішення про вибір розподілення імовірностей.

Процес старіння, що має місце при експлуатації як традиційного, так і блочно-комплектного обладнання магістральних газопроводів, зручно формулювати в термінах функції інтенсивності відмов. В простішому випадку, коли процеси старіння відсутні, має місце постійність інтенсивності відмов, що відповідає випадку експоненціального розподілення. В число параметричних сімейств розподілень часу безвідмовної роботи, у котрих інтенсивність відмов монотонно змінюється (зростає або падає) в часі розподілення Вейбулла, гамма-розподілення, усічене нормальне розподілення.

Розподілення Вейбулла є двопараметричним розподіленням екстремальної величини і задається у вигляді

$$F_\alpha(t) = 1 - e^{-(\lambda t)^\alpha}$$

для $t \geq 0$, де $\lambda, \alpha > 0$.

Частковими випадками розподілення Вейбулла є експоненціальне і релеєвське розподілення.

Розподілення Вейбулла використовується для описання втомлюваних явищ, зносів, поломок.

Тому в даній статті при моделюванні і розрахунках стратегій і режиму обслуговування блочно-комплектного обладнання магістральних газопроводів використано розподілення Вейбулла.

Таким чином для розподілення часу роботи в справному стані маємо:

$$F(t) = 1 - exp(-a_F t^{b_F}), \tag{7}$$

$$\overline{F}(t) = exp(-a_F t^{b_F}); \tag{8}$$

а для розподілення часу роботи в передвідмовному (несправному, але роботоздатними) стані маємо:

$$\Phi(t) = 1 - exp(-a_\Phi t^{b_\Phi}), \tag{9}$$

$$\overline{\Phi}(t) = \exp(-a_\Phi t^{b_\Phi}), \tag{10}$$

де: a_F і a_Φ – параметр масштабу,

b_F і b_Φ – параметр форми.

Для середнього напрацювання до заміни або зняття з експлуатації отримуємо:

$$\begin{gathered} t'_P(\theta, T_P) = \sum_{\kappa=0}^{n-1} \int_{\kappa\theta}^{(\kappa+1)\theta} dF(t) \times \\ \times \left\{ t + \overline{\Phi} \times \left[(\kappa+1)\theta - t\right] \times \left[(\kappa+1)\theta - t\right] + \right. \\ \left. + \int_0^{(k+1)\theta - t} d\Phi(y) y \right\} + \int_{n\theta}^{T_P - t} dF(t) \times \\ \times \left\{ t + \overline{\Phi}\left(T_P - t\right)\left(T_P - t\right) + \int_{n\theta}^{T_P - t} d\Phi(y) y \right\} + \\ + \overline{F}\left(T_P\right) T_P .\end{gathered} \tag{11}$$

Середній час на обслуговування визначаємо з наступного отриманого виразу:

$$t_p(\theta,T_p)=\sum_{\kappa=0}^{n-1}\int_{\kappa\theta}^{(\kappa+1)\theta}dF(t)\times$$

$$\times\left\{\kappa\tau_{пр}+\overline{\Phi}\times\left[(\kappa+1)\theta-t\right]\times\left[\tau_{пр}+\tau_{пред}\right]+\right.$$

$$\left.+\int_{0}^{(k+1)\theta-t}d\Phi(y)\tau_{ab}\right\}+\int_{n\theta}^{T_p-t}dF(t)\times \qquad (12)$$

$$\times\left\{n\tau_{пр}+\overline{\Phi}\left(T_p-t\right)\tau_{пл.пред}+\Phi\left(T_p-t\right)\tau_{ab}\right\}+$$

$$+\overline{F}\left(T_p\right)\left[\tau_{пл}+n\tau_{пр}\right].$$

Як вказано вище, питомими показниками ефективності обслуговування і ремонту є:

$\overline{З}_p=\dfrac{З_p}{t'_p}$ – питомі затрати на одиницю напрацювання;

$\overline{З}'_p=\dfrac{З_p}{t'_p+t_p}$ – питомі затрати на одиницю календарного часу;

$K_Г=\dfrac{t'_p}{t'_p+t_p}$ – середня доля часу в роботоздатному стані (коефіцієнт готовності).

За умови наявності повної інформації про тривалість роботи об'єкту в справному і передвідмовному (перед аварійному) стані (тобто відомі функції розподілення F(t) і Φ(t) знаходимо оптимальне число перевірок і їх періодичність, котрі забезпечують мінімальні затрати при умові забезпечення високого коефіцієнту готовності.

Таким чином при обслуговуванні відокремленого блочно-комплектного обладнання магістрального газопроводу по стратегії B маємо:

$$\overline{З}_p=\left\langle\sum_{\kappa=0}^{n-1}\int_{\kappa}^{(\kappa+1)\theta}dF(t)\times\left\{\kappa C_{пр}+\overline{\Phi}\times\left[(\kappa+1)\theta-t\right]\times\right.\right.$$

$$\left.\times\left[C_{пр}+C_{пред}\right]+\int_{0}^{(k+1)\theta-t}d\Phi(y)\left[C_{ав}\right]\right\}+\int_{n\theta}^{T_p}dF(t)\times$$

$$\times\left\{nC_{пр}+\overline{\Phi}\left(T_p-t\right)\times C_{пл.пред}++\Phi\left(T_p-t\right)\times C_{ав}\right\}+$$

$$\left.+\overline{F}\left(T_p\right)\left[C_{пл}+nC_{пр}\right]\right\rangle\times\left\langle\sum_{\kappa=0}^{n-1}\int_{\kappa\theta}^{(\kappa+1)\theta}dF(t)\times\right.$$

$$\times\left\{t+\overline{\Phi}\times\left[(\kappa+1)\theta-t\right]\times\left[(\kappa+1)\theta-t\right]+\right. \qquad (13)$$

$$\left.+\int_{0}^{(k+1)\theta-t}d\Phi(y)y\right\}+\int_{n\theta}^{T_p-t}dF(t)\times\left\{t+\overline{\Phi}\left(T_p-t\right)\times\right.$$

$$\left.\left.\times\left(T_p-t\right)+\int_{n\theta}^{T_p-t}d\Phi(y)y+\overline{F}\left(T_p\right)T_p\right\}\right\rangle^{-1}.$$

Для коефіцієнта готовності після нескладних перетворень маємо:

$$K_Г=1+\left\langle\sum_{\kappa=0}^{n-1}\int_{\kappa\theta}^{(\kappa+1)\theta}dF(t)\times\left\{\kappa\tau_{пр}+\overline{\Phi}\begin{bmatrix}(\kappa+1)\times\\ \times\theta-t\end{bmatrix}\times\right.\right.$$

$$\left.\times\left[\tau_{пр}+\tau_{пред}\right]+\int_{0}^{(k+1)\theta-t}d\Phi(y)\tau_{ab}\right\}+\int_{n\theta}^{T_p-t}dF(t)\times$$

$$\times\left\{n\tau_{пр}+\overline{\Phi}\left(T_p-t\right)\times\tau_{пл.пред}+\Phi\left(T_p-t\right)\tau_{ab}\right\}+$$

$$\left.+\overline{F}\left(T_p\right)\left[\tau_{пл}+n\tau_{пр}\right]\right\rangle\times\left\langle\int_{\kappa\theta}^{(\kappa+1)\theta}dF(t)\times\right. \qquad (14)$$

$$\times\left\{t+\overline{\Phi}\left[(\kappa+1)\theta-t\right]\times\left[(\kappa+1)\theta-t\right]+\int_{0}^{(k+1)\theta-t}d\Phi(y)y\right\}+$$

$$+\int_{n\theta}^{T_p-t}dF(t)\times\left\{t+\overline{\Phi}\left(T_p-t\right)\times\left(T_p-t\right)+\int_{n\theta}^{T_p-t}d\Phi(y)y\right\}+$$

$$\left.+\overline{F}\left(T_p\right)T_p\right\rangle.$$

Очевидно, що при n = 0, тобто $\theta\to\infty$, отримуємо вираз для стратегії А, при $T_p\to\infty$ отримаємо вираз для стратегії С.

Задачу вибору оптимального (раціонального режиму обслуговування БКО магістральних газопроводів природно розглядати як оптимізаційну задачу, що дає змогу мінімізувати питомі затрати на обслуговування БКО за обмежень, накладених на коефіцієнт готовності обладнання. Таким чином, за наявності повної інформації про параметри функцій розподілення F(t) і Φ(t) задача вибору оптимального режиму обслуговування БКО запишеться у вигляді

$$\left.\begin{array}{l}\min\limits_{\theta,T_p}\overline{З}_p\left(\theta,T_p\right)\\ \text{при}\qquad K_Г\left(\theta,T_p\right)\ge K^0_{Г\,min}\end{array}\right\}, \qquad (15)$$

де $K^0_{Г\,min}$ – задане мінімальне значення коефіцієнту готовності.

Оптимізаційна задача визначення режиму обслуговування розв'язується числовими методами.

При розподіленні Вейбулла отримати в явному вигляді аналітичні вирази для затрат, часу напрацювання і часу обслуговування неможливо. Однак для експоненціального розподілу вдалося вивести аналітичні вирази.

Для стратегії С ($\theta \to \infty;\ T \to \infty$), тобто з періодичними перевірками без запланованих попереджувальних замін (найпростіший випадок стратегії обслуговування по стану) при $a_F \ne a_\Phi$, $\overline{F}(t) = exp\,(-a_F t)$ і $\overline{\Phi}(t) = exp\,(-a_\Phi t)$

$$\text{З}_{р} = C_{\text{ав}} + \frac{a_F\left(C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}}\right)}{a_\Phi - a_F} e^{-a_\Phi\theta} - \left[C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} + \frac{a_F\left(C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}}\right)}{a_\Phi - a_F}\right] e^{-a_F\theta}; \quad (16)$$

$$t_{р} = \tau_{\text{ав}} + \frac{a_F\left(\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}}\right)}{a_\Phi - a_F} e^{-a_\Phi\theta} - \left[\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} + \frac{a_F\left(\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}}\right)}{a_\Phi - a_F}\right] e^{-a_F\theta}; \quad (17)$$

$$t'_{р} = \left[\frac{1}{a_F} + \frac{1}{a_\Phi} + \frac{a_F}{a_\Phi} \cdot \frac{1}{a_\Phi - a_F}\right] \times \left(e^{-a_\Phi\theta} - e^{-a_F\theta}\right). \quad (18)$$

Для випадку $a_F = a_\Phi = a$ отримані наступні аналітичні вирази:

$$\text{З}_{р} = C_{\text{ав}} + \left(C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}}\right) e^{-a\theta} - \left(C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}}\right) a\theta e^{-a\theta}; \quad (19)$$

$$t_{р} = \tau_{\text{ав}} + \left(\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}}\right) e^{-a\theta} - \left(\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}}\right) a\theta e^{-a\theta}. \quad (20)$$

Вирази (16–20) отримані для часткового випадку, коли

$$F(t) = 1 - exp\,(-a_F t)$$

$$\text{і}\ \ \Phi(t) = 1 - exp\,(-a_\Phi t);$$

при цьому $a = \dfrac{1}{t_{ср}}$, де $t_{ср}$ – середній час.

Для випадку, коли координати θ^* екстремумів питомих затрат $\overline{\text{З}}_{р}$ і коефіцієнту готовності $К_Г$ знаходяться як розв’язок трансцендентного рівняння:

$$\overline{\text{З}}_{р} \to \frac{C_{\text{ав}} - C_{\text{пред}}}{C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}}} = a\theta_{\text{З}}^* + e^{-a\theta_{\text{З}}^*}; \quad (21)$$

$$К_Г \to \frac{\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пред}}}{\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}}} = a\theta_Г^* + e^{-a\theta_Г^*}; \quad (22)$$

де $\theta_{\text{З}}^*$ $і$ $\theta_Г^*$ – періодичність перевірок, при котрій досягаються екстремальні значення питомих затрат і коефіцієнту готовності відповідно.

Наближена оцінка значення θ^* для $max\,К_Г$ проводилась за формулами

$$\theta_Г^* = \begin{cases} \dfrac{1}{a} \cdot \dfrac{1{,}5\tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}}} \\ \text{при}\ \ 0{,}5\,\tau_{\text{пр}} < \tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}} \\ \dfrac{1}{a} \cdot \dfrac{\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пред}}}{\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}}} \\ \text{при}\ \ \dfrac{\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пред}}}{3} > \tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}} \end{cases} \quad (23)$$

Аналогічно оцінювалось значення θ^* для $min\,\overline{\text{З}}_{р}$:

$$\theta_{\text{З}}^* = \begin{cases} \dfrac{1}{a} \cdot \dfrac{1{,}5C_{\text{пр}}}{C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}}} \\ \text{при}\ \ 0{,}5\,C_{\text{пр}} < C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}} \\ \dfrac{1}{a} \cdot \dfrac{C_{\text{ав}} - C_{\text{пред}}}{C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}}} \\ \text{при}\ \ \dfrac{C_{\text{ав}} - C_{\text{пред}}}{3} > C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}} \end{cases} \quad (24)$$

Звідси видно, що при $\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}} \le 0$ перевірки недоцільні (то ж і при $C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}} \ge 0$).

Значення коефіцієнту готовності і середніх питомих затрат в точці екстремуму, тобто при $\theta = \theta^*$ знаходимо з виразів:

$$К_Г\left(\theta^*\right) = \frac{2}{a^2\left(\tau_{\text{ав}} - \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{пред}}\right)\theta^* + a\tau_{\text{пред}} + 2}, \quad (25)$$

$$\overline{\text{З}}_{р}\left(\theta^*\right) = \frac{a^2\left(C_{\text{ав}} - C_{\text{пр}} - C_{\text{пред}}\right)\theta^* + aC_{\text{пр}}}{2}. \quad (26)$$

Для стратегії планових попереджувальних замін по напрацюванню без перевірок, тобто стратегії А ($\theta \to \infty; T < \infty$) також отримані аналітичні вирази. При експоненціальному розподіленні (частковий випадок розподілу Вейбулла) маємо:

якщо $a_F \ne a_\Phi$, то:

$$\text{З}_{р} = C_{\text{ав}} + \frac{a_F}{a_\Phi - a_F}\left(C_{\text{ав}} - C_{\text{пл пред}}\right) e^{-a_\Phi T} - \left[C_{\text{ав}} - C_{\text{пл}} + \frac{a_F\left(C_{\text{ав}} - C_{\text{пл.пред}}\right)}{a_\Phi - a_F}\right] e^{-a_F T}; \quad (27)$$

$$t_p = \tau_{ав} + \frac{a_F}{a_Ф - a_F}\left(\tau_{ав} - \tau_{пл.пред}\right)e^{-a_Ф T} -$$
$$-\left[\tau_{ав} - \tau_{пл} + \frac{a_F\left(\tau_{ав} - \tau_{пл.пред}\right)}{a_Ф - a_F}\right]e^{-a_F T}; \quad (28)$$

$$t_p' = \left[\frac{1}{a_F} + \frac{1}{a_Ф} + \frac{a_F}{a_Ф}\cdot\frac{1}{a_Ф - a_F}\right]\times$$
$$\times\left(e^{-a_Ф T} - e^{-a_F T}\right). \quad (29)$$

За умови $a_F = a_Ф = a$

$$З_p = C_{ав} - \left(C_{ав} - C_{пл}\right) e^{-aT} -$$
$$-\left(C_{ав} - C_{пл.пред}\right) aTe^{-aT}; \quad (30)$$

$$t_p = \tau_{ав} - \left(\tau_{ав} - \tau_{пл}\right) e^{-aT} -$$
$$-\left(\tau_{ав} - \tau_{пл.пред}\right) aTe^{-aT}; \quad (31)$$

$$t_p' = \frac{2}{a}\cdot\left(1 - e^{-aT}\right). \quad (32)$$

Для знаходження екстремумів T^* маємо:

$$З_p \rightarrow \frac{C_{ав} - C_{пл.пред} + C_{пл}}{C_{ав} - C_{пл.пред}} = aT_З^* + e^{-aT_З^*}; \quad (33)$$

$$K_Г \rightarrow \frac{\tau_{ав} - \tau_{пл.пред} + \tau_{пл}}{\tau_{ав} - \tau_{пл.пред}} = aT_Г^* + e^{-aT_Г^*}. \quad (34)$$

Наближена оцінка значення T^* для $max\, K_Г$ проводилась:

$$T_Г^* = \begin{cases} \dfrac{1}{a}\cdot\dfrac{1{,}5\tau_{пр}}{\tau_{ав} - \tau_{пл.пред}} \\ \text{при } 0{,}5\ \tau_{пл} < \tau_{ав} - \tau_{пл.пред} \\ \dfrac{1}{a}\cdot\dfrac{\tau_{ав} - \tau_{пл.пред} + \tau_{пл}}{\tau_{ав} - \tau_{пл.пред}} \\ \text{при } \dfrac{\tau_{ав} - \tau_{пл.пред} + \tau_{пл}}{3} > \tau_{ав} - \tau_{пл.пред} \end{cases} \quad (35)$$

Аналогічно для $min\, \overline{З}_p$:

$$T_З^* = \begin{cases} \dfrac{1}{a}\cdot\dfrac{1{,}5C_{пл}}{C_{ав} - C_{пл.пред}} \\ \text{при } 0{,}5\ C_{пл} < C_{ав} - C_{пл.пред} \\ \dfrac{1}{a}\cdot\dfrac{C_{ав} - C_{пл.пред} + C_{пл}}{C_{ав} - C_{пл.пред}} \\ \text{при } \dfrac{C_{ав} - C_{пл.пред} + C_{пл}}{3} > C_{ав} - C_{пл.пред} \end{cases} \quad (36)$$

Визначаємо значення коефіцієнту готовності і питомих затрат в точці екстремуму, тобто при $T=T^*$:

$$K_Г\left(T^*\right) = 2\cdot\left\{a^2\left(\tau_{ав} - \tau_{пл.пред}\right)T^* +\right.$$
$$\left. + a\left(\tau_{пл.пред} - \tau_{пл}\right) + 2\right\}^{-1}; \quad (37)$$

$$\overline{З}_p\left(T^*\right) = 0{,}5a^2\left(C_{ав} - C_{пл.пред}\right)T^* +$$
$$+ a\left(C_{пл.пред} - C_{пл}\right). \quad (38)$$

Для розглянутого часткового випадку ($a_F = a_Ф = a$) маємо:

густина імовірності напрацювання на відмову (спеціальне розподілення Єрланга другого порядку)

$$f(t) = a^2 te^{-at}; \quad (39)$$

функція інтенсивності відмов

$$\varphi(t) = \frac{at}{t+1}; \quad (40)$$

зростаюча, обмежена, при малих t може бути апроксимована лінійною залежністю

$$\varphi(t) = at, \quad (41)$$

що відповідає релеєвському закону розподілу $V(t)$ напрацювання на відмову

$$V(t) = 1 - e^{-0{,}5at^2}. \quad (42)$$

Висновки: Методи які описані дадуть можливість виявляти зносові і втомні відмови, так і для густини розподілу напружень і міцності, тобто для цілого ряду елементів (блоків, модулів, вузлів, агрегатів і деталей) механічного блочно-комплектного обладнання, наприклад, ГПА.

Література

1 Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.

2 Терентьев А.Н., Седых З.С., Дубинский В.Г. Надежность газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. – М.: Недра, 1979. – 207 с.

3 Трубопровідний транспорт газу / М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Михалків та ін. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.