

# Наука — виробництву

УДК 621.438:622

DOI: 10.31471/1993-9973-2018-3(68)-31-37

## ПРОГНОЗУВАННЯ РЕМОНТНИХ РОБІТ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ В УМОВАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБСЛУГОВУВАННЯ

<sup>1</sup> В.Я. Грудз, <sup>1</sup> Я.В. Грудз, <sup>2</sup> В.М. Боднар, <sup>3</sup> В.В. Самсоненко

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727138,  
e-mail: public@nimg.edu.ua

<sup>2</sup>БМФ Укргазпромбуд; 076001, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 775931,  
e-mail: bodnar-vm@utg.ua

<sup>3</sup>УМГ Харківтрансгаз; 61001, м. Харків, вул. Культури, 20А, тел. (057) 7019303,  
e-mail: samsonenko-vv@utg.ua

Розглядається процес керування технічним станом магістральних газопроводів, які включають різноманітні елементи і мають складну розгалужену і за кільцювану структуру. Задача відноситься до категорії оптимізації процесу обслуговування. Метою дослідження є оптимізація графіка профілактичних ремонтів системи газопостачання, яка включає незалежні підсистеми. Оптиміальний графік технічного обслуговування визначиться з умови вибору значень моментів часу, що забезпечують екстремум показників якості функціонування комплексу технологічних об'єктів у зоні централізованого обслуговування системи газопостачання. Як критерій оптимальності процесу обслуговування запропоновано використати техніко-економічний показник, зокрема середні сумарні питомі витрати на експлуатацію системи. Отримані в результаті проведених досліджень залежності дають змогу оцінювати режими обслуговування складної системи газопостачання, що включає різноманітні, територіально розосереджені, але функціонально взаємозалежні технологічні об'єкти системи газопостачання в регіоні центральної бази технічного обслуговування і ремонту, вони дають можливість розраховувати оптимальний графік планових ремонтів системи газопостачання.

Ключові слова: система газопостачання, обслуговування, оптимізація, графік профілактичних ремонтів, сумарні питомі витрати.

Рассматривается процесс управления техническим состоянием магистральных газопроводов, которые включают разнотипные элементы и имеют сложную разветвленную и закольцованную структуру. Задача относится к категории оптимизации процесса обслуживания. Целью исследования является оптимизация графика профилактических ремонтов системы газоснабжения, которая включает независимые подсистемы. Оптимальный график технического обслуживания определится из условия выбора значений моментов времени, обеспечивающих экстремум показателей качества функционирования комплекса технологических объектов в зоне централизованного обслуживания системы газоснабжения. Как критерий оптимума процесса обслуживания предложено использовать технико-экономический показатель, в частности средние суммарные удельные расходы на эксплуатацию системы. Полученные в результате проведенных исследований зависимости позволяют оценивать режимы обслуживания сложной системы газоснабжения, включающие разнотипные, территориально рассредоточенные, но функционально взаимозависимые технологические объекты системы газоснабжения в регионе центральной базы технического обслуживания и ремонта, они позволяют рассчитывать оптимальный график плановых ремонтов системы газоснабжения.

Ключевые слова: система газоснабжения, обслуживания, оптимизация, график профилактических ремонтов, суммарные удельные расходы.

The management process of the gas-main pipelines' technical state that includes different-type constituent elements and has a complex multihole and looped structure is considered. The task falls under the optimization category of the maintenance process. The study aims to optimize the preventive overhaul graph of the gas supply system that includes independent subsystems. An optimum schedule of maintenance service will be determined by selection condition of the timepoint values that provide with the quality indicators' extremum of the functioning of the process facility complex within a centralized service of gas supply system. It was suggested the technical-and-economic index, in particular the average summarized unit costs to system operation, be used as a criterion for the optimality of maintenance process. The characteristic curve obtained from conducted studies provides a way to estimate the maintenance states of the complicated gas supply system that includes different-type, geographically distributed but functionally interlinked process facilities of the gas supply system in the region of the central maintenance and repair base, they give an opportunity to plan an optimum schedule of the preventive overhaul of the gas supply system.

Keywords: gas supply system, maintenance, optimization, preventive overhaul graph, summarized unit costs.

Система магістральних газопроводів, з точки зору процесу обслуговування, є надзвичайно складною технічною мережею з розгалуженою і закільцьованою газотранспортною мережею, спорудженою з різнотипових газопроводів як її елементів, компресорних (КС) та газорозподільних станцій (ГРС), пов'язаних між собою складними функціональними залежностями. Тому процес профілактичного обслуговування газотранспортної системи (ГТС) слід розглядати як багатofакторну оптимізаційну задачу в умовах централізованої системи обслуговування.

Розглянемо процес керування технічним станом об'єктів у регіоні централізованого обслуговування системи газопостачання, що включає незалежні і безупинно функціонуючі об'єкти (розглянуті як технічні підсистеми). Під незалежними підсистемами розуміють незалежність їхніх відмов – допущення, що є основним, як правило, при розгляді надійності трубопровідних систем з позиції системного підходу.

Як підсистеми беруться до уваги окремі КС, ГРС, багатониткові ділянки лінійної частини трубопроводів, а також окремі вузли (перемички, запірні арматури).

Географічно централізована система обслуговування ГТС опирається на ряд пунктів, розміщених вздовж траси магістрального газопроводу і обладнаних спеціальною ремонтною технікою, яка дозволяє раціонально проводити роботи з обслуговування різних об'єктів. Збільшення числа опорних пунктів призведе, з одного боку, до прискорення робіт з відновлення технічного стану газотранспортної системи (підвищення експлуатаційної надійності) і до здорожчання процесу обслуговування загалом за рахунок збільшення витрат на їх утримання. Тому має місце оптимізаційна задача вибору раціонального числа опорних пунктів централізованої системи обслуговування і їх розміщення вздовж траси газопроводу. При цьому виникає задача оптимального керування централізованою системою обслуговування, яка повинна за наявності даної кількості технічних засобів і їх розміщення в опорних пунктах забезпечити максимально високу надійність експлуатації ГТС.

Мета задач керування обслуговуванням – складання оптимального графіка планових відновлювальних ремонтів технологічного устаткування на об'єктах зони централізованого обслуговування і ремонту об'єктів ГТС.

При виведенні основних залежностей, що описують процес обслуговування системи і дають змогу одержати оптимальні його показники, використовуються наступні припущення для технологічного устаткування об'єктів системи газопостачання:

1) потік відмов технологічного устаткування є пуассонівським нестационарним. Імовірність появи  $K$  відмов на  $i$ -му технологічному об'єкті системи газопостачання за час  $(t_1, t_2)$  визначиться як:

$$P_K^{(i)}(t_1, t_2) = \frac{[\Lambda_i(t_2) - \Lambda_i(t_1)]}{K!} \times \exp[\Lambda_i(t_1) + \Lambda_i(t_2)]; \quad (1)$$

2) планові профілактичні роботи на окремих об'єктах системи газопостачання незалежні;

3) тривалість аварійного ремонту  $\xi_i$  технологічного устаткування на  $i$ -му об'єкті є випадковою величиною з довільною функцією розподілу  $G_i(x)$  і з математичним очікуванням  $\tau_{cp}^{AP(i)}$ ;

4) середня тривалість планових попереджувальних ремонтів на  $i$ -му об'єкті обслуговування детермінована і стала, тобто  $\tau_{cp}^{-np} = const$ ;

5) порядок організації обслуговування:  $i$ -тий експлуатований об'єкт через деякий календарний період часу  $\tau_i$  після проведення планового ремонту  $(i-1)$ -го технологічного об'єкта і триваючого  $\tau_{cp}^{-np(i-1)}$ , виводиться на плановий ремонт із середньою тривалістю  $\tau_{cp}^{-np(i-1)}$  для  $i=1$  підсистеми, з номером  $(i-1)$  буде  $m$ -на підсистема.

У практиці експлуатації основного устаткування газотранспортної системи виділяються два випадки планового обслуговування: а) планові ремонти проводяться при нормально функціонуючому об'єкті включенням резервних блоків; б) планові ремонти пов'язані з порушенням основного технологічного режиму об'єкта обслуговування. Оскільки основні об'єкти системи газопостачання є резервованими, доцільно розглянути перший випадок проведення планових заходів, однак для більшої простоти висновків розглянемо другий випадок, після чого врахуємо специфічні особливості першого підходу.

Оптимальний розклад технологічного обслуговування визначиться з умови вибору значень  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_m$ , що забезпечують екстремум показників якості функціонування комплексу технологічних об'єктів у зоні централізованого обслуговування системи газопостачання.

Як критерій оптимізації системи ремонтів варто використовувати техніко-економічний показник, зокрема середні сумарні питомі витрати на експлуатацію системи. У цьому випадку розв'язок задачі полягає в описі показника середніх сумарних питомих витрат  $C(\bar{\tau})$  і зводиться до процедури

$$\min_{\bar{\tau}} C(\bar{\tau}) = C(\bar{\tau}^*), \quad (2)$$

де  $\bar{\tau}$  –  $m$ -мірний вектор.

Функція мети визначиться із залежності:

$$C(\bar{\tau}) = \frac{\sum_{i=1}^r a_i C}{K_r(\bar{\tau})}, \quad (3)$$

де  $r$  – число станів системи газопостачання;

$a_i$  – середні питомі витрати, зв'язані з перебуванням комплексу об'єктів системи газопостачання в  $i$ -тому стані;

$K_i(\bar{\tau})$  – коефіцієнт, визначений як частка часу, яку система проводить у  $i$ -му стані в стаціонарному процесі обслуговування;

$K_r(\bar{\tau})$  – коефіцієнт готовності системи (комплексу експлуатованих об'єктів) газопостачання загалом.

Якщо припустити, що кожний з територіально розосереджених об'єктів обслуговування може перебувати в трьох станах: справного функціонування, у планово-попереджувальному ремонті (ППР) та аварійному ремонті (АР), то загальне число станів системи газопостачання складе  $r = q^m$ , де  $q = 3$ .

Введемо в розгляд випадковий вектор  $\eta(t)$ , що характеризує стан системи газопостачання в довільний момент часу  $t$ ;  $i$ -тий компонент  $\eta(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) вектора  $\eta(t)$  має реалізацію:

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i - \text{тий об'єкт знаходиться} \\ & \text{в робочому стані } E_1^{(i)}; \\ 2, & \text{якщо на } i - \text{тому об'єкті проводяться} \\ & \text{ППР і він перебуває в стані } E_2^{(i)}; \\ 3, & \text{якщо } i - \text{тий об'єкт системи газо-} \\ & \text{постачання знаходиться в стані АР } E_3^{(i)}. \end{cases}$$

Таким чином, навіть при невеликому  $m$  число станів системи загалом є суттєво великою множиною. Число розглянутих станів системи газопостачання можна значно скоротити, якщо врахувати, що регіональна система газопоста-

чання обслуговується однією централізованою базою.

Припустимо, що на централізованій базі обслуговування системи наявна спеціалізована бригада планового обслуговування й аварійна бригада з високою оперативною готовністю, тобто обслуговування є роздільним. Тоді події, що полягають у реалізації станів  $E_2^{(i)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , – несумісні, що впливає з умови почергового планового обслуговування об'єктів системи. Події, що відповідають станам  $E_1^{(i)}$ ,  $E_3^{(i)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , – сумісні, так само як і події  $E_2^{(i)}$ ,  $E_3^{(i)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Якщо припустити, що одночасне настання більш двох аварійних відмов технологічних об'єктів у регіоні однієї централізованої бази обслуговування є подією малоймовірною, так само як і проведення планових робіт, коли в системі аварійно вийшло з ладу більше одного об'єкта, число розглянутих станів може бути додатково скорочено.

Припустимо також, що технологічне устаткування на кожному з об'єктів у зоні централізованого обслуговування системи обслуговується за зручною в практичній реалізації і дуже ефективною стратегією технічного обслуговування – стратегією календарного планування [2]. Тоді система загалом повертається у вихідний стан після проведення планових робіт на  $i$ -тій підсистемі стосовно її стану в момент закінчення попередніх планових робіт на тій же підсистемі. Отже, випадковий процес зміни станів  $\eta(t)$  – процес відновлення з періодом

$$t_p = \sum_{i=1}^m \left( \tau_i + \tau_{cp}^{np(i)} \right), \quad (4)$$

що дає змогу скористатися математичним апаратом теорії відновлення.

З огляду на (3) і (4), а також зроблені допущення про структуру обслуговування, функція мети набуває вигляду:

$$C(\bar{\tau}) = \left[ \sum_{i=1}^m a_{np}^{(i)} M \{ T_2^{(i)}(\bar{\tau}) \} + \sum_{i=1}^m a_{AP}^{(i)} M \{ T_3^{(i)}(\bar{\tau}) \} + \sum_{i=1}^m \sum_{K=1}^m \sum_{K>i} (a_{AP}^{(i)} + a_{AP}^{(K)}) M \{ T_3^{(i,K)}(\bar{\tau}) \} + \sum_{i=1}^m \sum_{K=1}^m \sum_{K \neq i} (a_{np}^{(i)} + a_{AP}^{(K)}) M \{ T_{2,3}^{(i,K)}(\bar{\tau}) \} \right] \times \left[ M \{ T_1(\bar{\tau}) \} \right]^{-1} \quad (5)$$

де  $M \{ T_1(\bar{\tau}) \}$  – математичне очікування (МО) часу безвідмовної роботи системи газопостачання за період відновлення випадкового процесу  $\eta(t)$ ;

$M \{ T_2^{(i)}(\bar{\tau}) \}$  – МО часу перебування  $i$ -го об'єкта системи газопостачання в плановому

попереджувальному ремонті при справній роботі інших  $m - 1$  експлуатованих об'єктів;

$$M\{T_3^{(i)}(\bar{\tau})\} - \text{МО часу перебування } i\text{-го}$$

технологічного об'єкта в аварійному відновлювальному ремонті при нормальній роботі інших  $m - 1$  об'єктів системи;

$$M\{T_3^{(i,K)}(\bar{\tau})\} - \text{МО часу спільного пере-}$$

бування  $i$ -го і  $K$ -го ( $K \neq 1$ ) об'єктів системи газопостачання в аварійному відмовленні при справній роботі інших;

$$M\{T_{2,3}^{(i,K)}(\bar{\tau})\} - \text{МО часу простою } i\text{-го тех-}$$

нологічного об'єкта в плановому ремонті разом з  $K$ -м в аварійному ремонті ( $K \neq 1$ ) при нормальній роботі інших  $m = 2$  об'єктів системи газопостачання.

Тоді

$$M\{T_1^{(i)}(\bar{\tau})\} = \sum_{i=1}^m \int_0^{\tau_i} \prod_{j=1}^m [1 - \tau_{cp}^{AP(i)} \lambda_j (\xi_{ij} + x)] dx. (6)$$

Середній час перебування  $i$ -го експлуатованого об'єкта системи газопостачання в плановому відбудовному ремонті при справному функціонуванні інших об'єктів комплексу визначиться аналогічним чином:

$$M\{T_2^{(i)}(\bar{\tau})\} = \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} S_i(\theta) d\theta, (7)$$

де  $S_i(\theta)$  - імовірність безвідмовної роботи  $m - 1$  об'єктів системи в момент  $\theta$  з інтервалу  $(0, \tau_{cp}^{np(i)})$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Оскільки остання подія спостерігається при настанні  $m - 1$  спільних подій, то

$$S_i(\theta) = \prod_{\substack{j=1 \\ J \neq i}}^m P_{ij}(\theta), (8)$$

де  $P_{ij}(\theta)$  - імовірність того, що  $j$ -й об'єкт системи газопостачання нормально функціонує у даний момент.

Враховуючи дані припущення, вираз для  $P_{ij}(\theta)$  у (8) визначиться аналогічно (5):

$$P_{ij}(\theta) \approx \prod_{\substack{j=1 \\ J \neq i}}^m [1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j (\xi_{ij} + \tau_i + \theta)]. (9)$$

Підставивши (8) і (9) у (7), одержимо:

$$M\{T_2^{(i)}(\bar{\tau})\} = \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m [1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j (\xi_{ij} + \tau_i + \theta)] d\theta. (10)$$

Аналогічно (4) середній час перебування  $i$ -го експлуатованого об'єкта в аварійному ремонті при безвідмовній роботі інших технологічних об'єктів системи газопостачання за період відновлення процесу  $\eta(t)$ :

$$M\{T_3^{(i)}(\bar{\tau})\} = \int_0^{\tau_i} U_i(t) dt = \sum_{K=1}^m \int_0^{\tau_i} U_i(t) dt, (11)$$

де  $U_i(t)$  - імовірність перебування  $i$ -го об'єкта в аварійному відновленні (позначимо подію  $A$ ) при нормальній роботі інших об'єктів системи (події  $B_j$ ,  $J = 1, 2, \dots, m$ ,  $j \neq 1$ ).

Оскільки подія  $A$  і події  $B$  сумісні, то

$$U_i(t) = P_{Ki}^A(t) \prod_{\substack{j=1 \\ J \neq i}}^m P_{Kj}^B(t), \quad K = 1, 2, \dots, m, (12)$$

де  $P_{Ki}^A(t)$  - імовірність застати  $i$ -тий експлуатований об'єкт у стані аварійного ремонту в момент  $t$ ,  $0 \leq t \leq \tau_K$ ;

$P_{Kj}^B(t)$  - імовірність перебування  $j$ -го об'єкта обслуговування системи газопостачання в працездатному стані в момент  $t$  з інтервалу  $(0, \tau_K)$ .

Подія  $A$  спостерігається при реалізації трьох неспільних подій:

$A_1$ , що полягає в тому, що до моменту  $t$   $i$ -тий технологічний об'єкт зовсім не відмовляв, але аварійне відмовлення настало саме до цього моменту;

$A_2$  - до моменту  $t$  устаткування  $i$ -го об'єкта системи відмовляло, але його працездатність була відновлена проведенням аварійних ремонтів і до розглянутого моменту часу  $t$  відмовило в черговий раз;

$A_3$  -  $i$ -тий експлуатований об'єкт системи відмовляв і до моменту  $t$  його черговий аварійний ремонт ще не закінчився.

Очевидно,  $A = A_1 \cup A_2 \cup A_3$ . Подія типу  $A$  полягає в тому, що при зроблених припущеннях про експлуатоване устаткування системи газопостачання можна вважати, що

$$P_{Ki}^A(t) \approx \tau_{cp}^{AP(i)} \lambda_j (\xi_{Ki} + t), \quad K = 1, 2, \dots, m, (13)$$

де  $\xi_{Ki}$  визначається з (4).

Оскільки події  $B_j$  ідентичні подіям  $\bar{A}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ ,  $J \neq 1$ , то

$$P_{Kj}^B(t) \approx 1 - \tau_{cp}^{AP(J)} \lambda_j (\xi_{Ki} + t). (14)$$

Підставивши (10) у (9), з врахуванням (12) і (13) запишемо:

$$M\{T_3^{(i)}(\bar{\tau})\} = (15)$$

$$= \sum_{K=1}^m \tau_{cp}^{AP(i)} \int_0^{\tau_K} \lambda_j (\xi_{Ki} + t) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m [1 - \tau_{cp}^{AP(J)} \lambda_j (\xi_{Ki} + t)] dt.$$

$C$  - перебування інших об'єктів системи в справному функціонуванні до цього ж моменту  $t$ ;

$$P_J^C(t) \approx 1 + \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j (\xi_{ij} + \tau_i + t),$$

$$J = 1, 2, \dots, m, j \neq i \neq K.$$

На підставі попередніх висновків

$$M\left\{T_{2,3}^{(i,K)}(\bar{\tau})\right\} = \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} P_K^B(t) \prod_{\substack{J=1 \\ J \neq i \neq K}}^m P_J^c(t) dt. \quad (16)$$

Для кожного з об'єктів системи можна записати:

$$M\left\{T_2^{(i)}(\bar{\tau})\right\} = \tau_{cp}^{np(i)} - M\left\{T_{2,3}^{(i,K)}(\bar{\tau})\right\};$$

$$M\left\{T_1^{(i)}(\bar{\tau})\right\} = t_p - M\left\{T_3^{(i)}(\bar{\tau})\right\} - M\left\{T_3^{(i,K)}(\bar{\tau})\right\}.$$

Остаточний вираз для функції мети  $C(\bar{\tau})$  запишемо підстановкою (6), (10), (15) і (2-10) у (6).

$$C(\bar{\tau}) = \left[ \sum_{i=1}^m a_{np}^{(i)} \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} \prod_{j=1, j \neq i}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + \tau_i + t)\right\} dt + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^m a_{AP}^{(r)} \sum_{i=1}^m \tau_{cp}^{AP(i)} \int_0^{\tau_i} \lambda_r(\xi_{ir} + t) \prod_{j=1, j \neq r}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + t)\right\} dt + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^m \sum_{K=1, K > r}^m \left(a_{AP}^{(r)} + a_{AP}^{(K)}\right) \sum_{i=1}^m \tau_{cp}^{AP(r)} \tau_{cp}^{AP(K)} \int_0^{\tau_i} \lambda_r(\xi_{ir} + t) \lambda_K(\xi_{iK} + t) \times \right. \\ \left. \times \prod_{j=1, j \neq r}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + t)\right\} dt + \sum_{i=1}^m \sum_{K=1, K \neq i}^m \left(a_{np}^{(i)} + a_{AP}^{(K)}\right) \tau_{cp}^{AP(K)} \times \right. \\ \left. \times \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} \lambda_K(\xi_{iK} + \tau_i + t) \prod_{j=1, j \neq i \neq K}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + \tau_i + t)\right\} dt \right] \times \\ \times \left[ \sum_{i=1}^m \int_0^{\tau_i} \prod_{j=1}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + t)\right\} dt \right]^{-1}, \quad (17)$$

де вираз для  $\xi_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, m$  визначаються з (9).

Як вказувалося раніше, планові відновлювальні ремонти основного устаткування, проведені на ряді об'єктів системи газопостачання, не пов'язані з порушенням технологічного режиму роботи об'єкта, що обслуговується. У цих випадках не виключені можливості настання аварійних відмов і під час проведення власне планового ремонту технологічного устаткування. Тоді події  $E_3^{(i)}$  можуть відбуватися на всьому періоді відновлення випадкового процесу  $\eta(t)$ , що характеризує стан системи.

Отримані залежності дають змогу досліджувати режими обслуговування складної системи газопостачання, що включає  $m$  різнотипних, територіально розосереджених, але функціонально взаємозалежних (загальними цілями функціонування) технологічних об'єктів системи газопостачання в регіоні центральної бази технічного обслуговування і ремонту, вони дають змогу розраховувати оптимальний графік планових ремонтів системи газопостачання, що включає  $m$  різнотипних розосереджених безупинно функціонуючих технологічних об'єктів.

У випадку обслуговування двох однакових об'єктів системи газопостачання ( $m = 2$ ) розв'язок розглянутої задачі зводиться до оптимізації виду:

$$\min_{\tau_1, \tau_2} C(\tau_1, \tau_2) = C(\tau_1^*, \tau_2^*). \quad (18)$$

У випадку двох однакових підсистем, якщо виконується умова  $1 - \tau_{cp}^{AP} \lambda(0) \geq 0$ , мінімум функції  $1 - K_r(\tau_1, \tau_2)$  досягається при  $\tau_1 = \tau_2$ . Оскільки для ряду технологічних об'єктів системи газопостачання умова  $1 - \tau_{cp}^{AP} \lambda(0) \geq 0$ , як правило, виконується, то для експлуатованого устаткування зводиться до

$$\min_{\tau} C(\tau) = C(\tau^*). \quad (19)$$

Тоді з (17) запишемо наступний вираз для функції мети:

$$C(\tau) = \left\{ a_{np} \tau_{cp}^{np} + a_{AP} \tau_{cp}^{AP} \times \right. \\ \left. \times \left[ \Lambda(\tau + \tau_{cp}^{np}) + \Lambda(\tau) + \Lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) \right] \right\} \times \\ \times \left\{ \tau - \tau_{cp}^{AP} \left[ \Lambda(\tau) + \Lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \tau_{cp}^{AP} \int_0^{\tau} \lambda(t) \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt \right] \right\}^{-1}. \quad (20)$$

Рівняння для визначення локальних екстремумів показника якості обслуговування в розглянутій системі визначиться з умови  $dC(\tau) / d\tau$ .

$$2\lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) \left\{ \tau - \tau_{cp}^{AP} \left( \int_0^{\tau} \lambda(t) dt + \int_0^{\tau} \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt - \right. \right. \\ \left. \left. - \tau_{cp}^{AP} \int_0^{\tau} \lambda(t) \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt \right) \right\} \times \left\{ 1 - \tau_{cp}^{AP} \left[ \lambda(\tau) - \right. \right. \\ \left. \left. - \lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) + 2\lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) - \tau_{cp}^{AP} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left( 2\lambda(\tau) \lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) - \lambda(\tau) \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np}) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \lambda'(\tau) \int_0^{\tau} \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt \right) \right] \right\}^{-1} - \\ - \left[ \int_0^{\tau} \lambda(t) dt + \int_0^{\tau_{cp}^{np}} \lambda(\tau + t) dt + \int_0^{\tau} \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt \right] = \\ = \frac{a_{np} \tau_{cp}^{np}}{a_{AP} \tau_{cp}^{AP}}.$$

Розв'язком (20) може бути безліч значень  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_m$ , яким функція лівої частини  $\psi(\tau)$  стає рівною значенням правої частини:

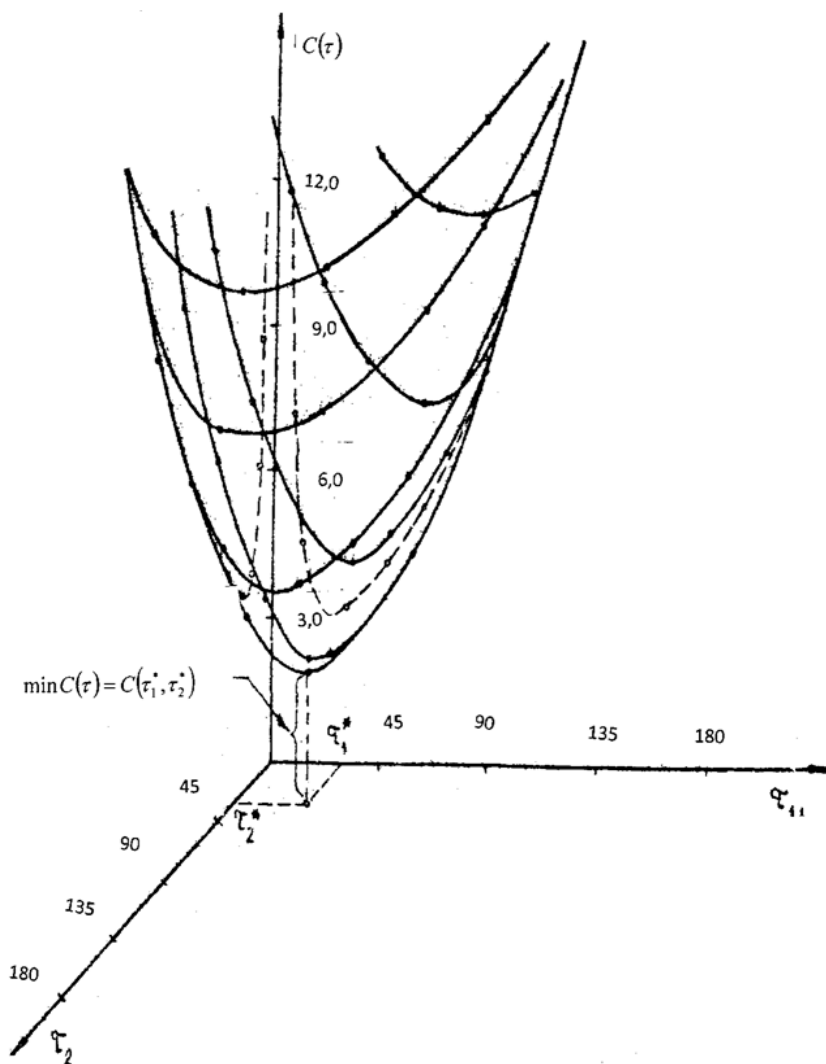


Рисунок 1 – Показники обслуговування і ремонту двох ГРС, розглянутих як єдиний комплекс

$$\frac{a_{np} \tau_{cp}^{-np}}{a_{AP} \tau_{cp}^{AP}} = const .$$

Оптимальні показники якості обслуговування обох об'єктів системи газопостачання - періодичність планових ремонтів і відповідне мінімальне значення середніх сумарних питомих витрат на експлуатацію - визначаються для значення  $\tau_i = \tau^*$ , при цьому досягається глобальний екстремум функції мети  $C(\tau) \rightarrow C(\tau^*)$ .

Якщо глобальний екстремум функції мети  $C(\tau)$  досягається для значень аргументу  $\tau^* = \infty$ , це означає, що проведення планових ремонтів технологічного устаткування на експлуатованих об'єктах системи газопостачання недоцільне. У цьому випадку розв'язок матиме вигляд:

$$C(\infty) = \frac{a_{AP} \tau_{cp}^{AP}}{\tau_{cp}} . \quad (22)$$

Оскільки система складається з двох незалежно функціонуючих підсистем, функція розподілу часу безвідмовної роботи системи загалом  $F(x)$ , необхідна для визначення  $\tau_{cp}$  у (22), визначиться як

$$F(x) = F_1(x) * F_2(x) , \quad (23)$$

тобто є композицією функцій розподілів часу безвідмовної роботи обох об'єктів обслуговування системи.

Оскільки в даному випадку розглядаються однакові об'єкти обслуговування, то

$$F(x) = \int_0^{\infty} f(x-z) f(z) dz , \quad (24)$$

де  $f(t)$  - щільність розподілу часу безвідмовної роботи кожної з підсистем;  $f(t) = dF_i(t) / dt, i = 1, 2$ .

На рисунку 1 зображено графік функції середніх сумарних питомих витрат  $C(\bar{\tau})$  на обслуговування і ремонт двох однакових ГРС, розглянутих як єдиний комплекс.

## Література

Слід зазначити, що показник середніх сумарних питомих витрат на експлуатацію виро-джується в середні питомі втрати.

Як бачимо, імовірність перебування системи в стані аварійної відмови одночасно двох об'єктів обслуговування і пов'язані з ними втрати – значення  $C_3$  - дуже малі щодо інших станів і втрат, що викликаються їхньою реалізацією. Ця обставина є визначальною для розглянутих об'єктів системи газопостачання, що володіють високою працездатністю. Аналіз процесу обслуговування системи газопостачання, що включає різні за чисельністю і характеристиках ГРС і ГРП, не змінює це уявлення про відносне кількісне співвідношення втрат  $C_1 - C_5$ .

Аналізовані стратегії обслуговування й отримані залежності дають змогу розраховувати оптимальні показники процесу обслуговування і ремонту основного устаткування системи газопостачання в рамках кожної зі стратегій - календарна періодичність  $\tau^*$ , напрацювання  $\theta^*$  стан  $K^*$  до планових попереджувальних ремонтів, а також відповідні екстремальні значення показника якості обслуговування і ремонту  $C(\tau^*)$ ,  $C(\theta^*)$  чи  $C(K^*)$ . У практиці експлуатації систем газопостачання через різні причини іноді виникають проблеми, пов'язані з дотриманням оптимальних графіків планових ремонтів. Тому доцільно враховувати й оцінювати можливості і наслідки перенесення чергового планового профілактичного ремонту. При цьому виникають дві типові ситуації.

1. Дострокове проведення профілактичного ремонту бажано в тому випадку, якщо виникає відмова експлуатованого устаткування, оптимальний термін якого наблизився до значень  $\tau^*$ ,  $\theta^*$  або  $K^*$ . Іноді доцільно не тільки усунути виниклу відмову, але і провести поза-чергові регламентні роботи.

2. Відтягування терміну початку планових попереджувальних заходів, коли до оптимального моменту  $\tau^*$ ,  $\theta^*$  або  $K^*$  не існує достатніх умов для їхнього проведення: відсутні резервне устаткування, чи запчастини достатня оперативна готовність ремонтних бригад або виникали різні розуміння оперативно-управлінського характеру.

У практиці експлуатації систем газопостачання профілактичні допуски для різного типу устаткування і різних експлуатаційних умов визначаються на підставі виробничого досвіду обслуговуючого персоналу. У теоретичних і прикладних дослідженнях організації ремонтного обслуговування устаткування систем газопостачання профілактичні допуски задаються заздалегідь. Значення  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  можна вибирати в границях 10...15% відповідних номінальних розрахункових чи нормативних значень.

1 Грудз В.Я. Обслуговування і ремонт газопроводів / Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Михалків В.Б., Костів В.В. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – 712 с.

2 Бразилевич Е.Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Бразилевич Е.Ю., Каштанов В.А. – М.: Сов.радио, 1971. – 122 с.

3 Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Бусленко Н.П.. – М.: Наука, 1978. – 421 с.

4 Керування режимами газотранспортних систем / В.Я.Грудз, М.Т.Лінчевський, В.Б.Михалків та ін. – К.: Укргазпроект, 1996. – 140 с.

5 Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / Мазур И.И., Иванцов О.М. – М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 1104 с.

6 Ornyak I.V., Likhman I.V. The spring splines procedure with prescribed accuracy for determination of the curvatures of the pipeline based on the 3-D measurements of its position // Rio Pipeline Conference & Exposition 2011, IBP1029\_11.

7 Fun Chen. New approach developed for estimating pour points of grucle oil blend / Fun Chen, Jinjun Zhang, Fan Zhang. // Oil S Gas Journal. – 2003. – №11. – p. 60-64.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
30.08.18

Рекомендована до друку  
професором **Середюк М.Д.**  
(ФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-м техн. наук **Говдяком Р.М.**  
(ІК «МАШЕКСПОРТ», м. Київ)