

## ВИЗНАЧЕННЯ ОБСЯГУ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ

<sup>1</sup>В.Я. Грудз, <sup>1</sup>Я.В. Грудз, <sup>2</sup>О.В. Ганжа, <sup>1</sup>Н.Я. Дрінь

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

<sup>2</sup>ПАТ «Рівнегаз»; 33027, м. Рівне, вул. Білякова, 4, тел.: (0362) 280889,  
e-mail: vtv@gas.rivne.com

Наведено загальні принципи вибору обсягу запасних частин в процесі експлуатації систем газопостачання для випадків відновлювальних і не відновлювальних елементів. Розглядається номенклатура як перелік номерів і найменувань запасних інструментів та приладдя, складений в певному групуванні і послідовності відповідно до технічної документації заводів-виготовлювачів і містить механічні деталі, вузли і агрегати. Критерії оцінки достатності комплекту запасних частин вибрано з умови достатньої надійності процесу експлуатації системи, заснованої на оцінках вірогідності появи відмови в період регулярної заміни елементів. Попит на запасні частини і матеріали носить випадковий характер і розглядається у вигляді стаціонарного процесу, описуваного розподілом Пуассона. Принцип розрахунку зводиться до визначення вірогідності того, що в механізмі будуть заповнені всі канали обслуговування і всі місця очікування відповідно до теорії масового обслуговування. В результаті запропоновано методіку розрахунку обсягу запасних частин в процесі експлуатації систем газопостачання.

Ключові слова: системи газопостачання, обсяг запасних частин, розподіл Пуассона.

Приводятся общие принципы выбора объема запасных частей при эксплуатации систем газоснабжения для случаев восстановительных и невозобновимых элементов. Рассматривается номенклатура как перечень номеров и наименований запасных инструментов и принадлежностей, составленный в определенном группировке и последовательности в соответствии с технической документацией заводов - изготовителей и содержит механические детали, узлы и агрегаты. Критерии оценки достаточности комплекта запасных частей выбрано из условия достаточной надежности процесса эксплуатации системы, основанную на оценках вероятности появления отказа в период регулярной замены элементов. Спрос на запасные части и материалы носит случайный характер и рассматривается в виде стационарного процесса, описываемого распределением Пуассона. Принцип расчета сводится к определению вероятности того, что в механизме будут заполнены все каналы обслуживания и места ожидания согласно теории массового обслуживания. В результате предложена методика расчета объема запасных частей при эксплуатации систем газоснабжения.

Ключевые слова: системы газоснабжения, объем запасных частей, распределение Пуассона.

General principles of the spare parts amount selection when operating gas supply systems for renewable and non-renewable elements have been developed. Nomenclature is considered as a list of numbers and names of spare instruments and equipment, which is compiled in accordance with a certain grouping and sequencing according to the producing plants technical documentation and which includes mechanical details, assemblies, and aggregates. The assessment criteria of the spare parts set sufficiency have been chosen based on the condition of the sufficient system operation reliability which is based on the estimates of the failure emergence probability during the period of regular element renewals. The demand for spare parts and materials is of random nature and it is considered as a stable process which is described by the Poisson's distribution. The calculation principle comes down to determine the possibility of the fact that all the service channels and waiting spaces in the mechanism will be filled in accordance with the queuing theory. The technique for spare parts amount selection when operating gas supply systems has been developed eventually.

Keywords: gas supply system, the amount of spare parts, the Poisson distribution.

Оперативна система обслуговування устаткування систем газопостачання повинна бути забезпечена достатнім резервом запасних елементів, що встановлюються замість несправних. Вузли, що відмовили, вибувають з сфери обслуговування і поступають на ремонтні бази. Така система вимагає обґрунтованого вибору обсягу запасних частин і періодів їх відновлення. Враховуючи структуру відмов і способи їх усунення, процеси обслуговування основно-го устаткування можна розділити на два види:

1) проведення профілактичних робіт і усунення дрібних несправностей, які не ведуть до тривалої системи газопостачання;

2) ремонт апаратури в умовах ремонтної бази або спеціалізованою виїзною бригадою із заміною вузла, що відмовив, запасним.

Комплект запасних інструментів і приладдя (ЗІП) повинен містити всі необхідні а процесі експлуатації елементи. Іноді відсутність необхідних елементів в комплектах ЗІП набагато збільшує час відновлення апаратури. Проте створення надмірних розмірів ЗІП економічно нераціонально, оскільки при цьому відбувається заморожування величезних засобів і нерідко дефіцитних елементів. Отже, правильне комплектування ЗІП, оптимізація його за вартістю - важлива проблема у вирішенні питань ремон-

топридатності основного устаткування систем газопостачання.

Кількість необхідних елементів в комплектах запасних частин газового устаткування визначається розрахунком залежно від причин відмов і середньої кількості очікуваних відмов (замін), раптових (поломка) і поступових (зношування, старіння, корозія) відмов.

Кількість запасних частин для основного газового устаткування залежить від рівня технічної експлуатації, термінів умов і режимів експлуатації, кваліфікації обслуговуючого персоналу, рівня організації і матеріального постачання резервними елементами і ін.

Інтенсивність відмов залежить від часу поповнення ЗПП, його необхідної достатності, організації постачання і ступеня його відновлюваності.

ЗПП розділяються на одиночний і груповий комплекти.

Одиночний комплект додається певному елементу системи газопостачання і призначається для забезпечення тільки даного елемента.

Груповий комплект додається як група елементів; він необхідний для поповнення одиничних комплектів ЗПП і забезпечення елементів тими складовими частинами, яких немає в одиничному комплекті.

При експлуатації устаткування комплекти ЗПП поповнюються: поодинокий - за рахунок групового, групового - за рахунок елементів, які розташовуються на спеціальному складі або є у відповідних службах постачання.

За характером використання елементи устаткування можна диференціювати на відновлювані (блоки, вузли, модулі і т.д.) і невідновлювані. До невідновлюваних відносяться такі елементи устаткування які після відмови недоцільно відновлювати. Відновлювані елементи групового устаткування ремонтують або на місці експлуатації силами обслуговуючого персоналу чи виїзних ремонтних бригад, або в спеціальних ремонтних службах.

Готовий виріб перед надходженням в експлуатацію забезпечується експлуатаційно-технічною документацією, що регламентує порядок підтримання якості в процесі використання за призначенням на компресорних станціях. Ці документи містять періодичність і об'єм оглядів і поточних ремонтів елементів системи газопостачання, інструкцію для обслуговуючого персоналу з відновлення їх якості після можливих відмов і несправностей, а також перелік запасних частин найбільш ненадійних деталей і вузлів.

Для правильного порядку виконання планово-попереджувальних оглядів і ремонтів, а також для визначення оптимальної кількості запасних частин і пристосувань необхідно використовувати показники надійності устаткування компресорної станції, отримані і забезпечені на всіх етапах їх створення.

Процес формування комплекту запасних частин складається з двох етапів: визначення номенклатури запасних вузлів, елементів і розрахунку їх кількості.

Номенклатурою запасних частин є перелік номерів і найменувань ЗПП, складених за певними групами і послідовностями відповідно до технічної документації заводів-виготовлювачів і містить механічні деталі, вузли і агрегати; деталі, комплекти і складальні одиниці електроустаткування, гідрообладнання, прилади паливної апаратури і систем живлення; вироби з гуми, пластмас, пробки та інших матеріалів. У номенклатуру запасних частин включаються також елементи систем, ресурс яких є меншим повного ресурсу системи до списання; елементи, які можуть мати в процесі експлуатації випадкові і аварійні пошкодження, які можуть виникнути при розбірно-складальних операціях; елементи, які можуть бути загублені в процесі експлуатації. Вказана номенклатура повинна розроблятися на початок випуску системи і уточнюватися в процесі їх експлуатації.

Номенклатура запасних частин газового устаткування в ремонтних комплектах залежить від умов і досвіду експлуатації аналогічних деталей; можливості попередження їх відмов; середнього ресурсу деталей; методики і досвіду ремонту устаткування на місці або на ремонтній базі.

При використанні агрегативного методу ремонту у складі ЗПП повинні знаходитися знімні агрегати (блоки, модулі). Якщо ремонт знімних відновлюваних елементів відбувається на місці експлуатації, то ЗПП додатково повинен містити невідновні елементи механізму.

Під час розрахунку кількості запасних елементів може статися так, що деякі деталі, включені в попередню номенклатуру, необхідно з неї виключити у випадку, якщо результати розрахунку свідчать, що вірогідність відмови їх в період експлуатації або ремонту незначна.

Для виявлення кількості запасних елементів для газового устаткування необхідно визначити залежність цієї кількості від стратегії профілактичного обслуговування. Профілактичні стратегії передбачаються в такому виді [1,5]:

– нульова або базова стратегія, яка полягає в наступному: при технічному обслуговуванні замінюють елементи, що тільки відмовили, тобто устаткування експлуатують без профілактичних замін елементів;

– групова стратегія замін, при якій належить встановлювати оптимальний інтервал замін  $T_3$ . При цьому в моменти часу  $T_3, 2T_3, 3T_3$  ... замінюють всі елементи даного типу, включаючи і ті з них, які недавно поставлені замість тих, що відмовили;

– стратегія замін із напрацювання або індивідуальна стратегія. В цьому випадку елемент, що знаходиться в системі, замінюють при напрацюванні  $T_3$ . Якщо відмова відбулася до цього часу, то профілактична заміна нового елемента, поставленого замість того, що відмовив, відтермінується і її здійснюють тільки після фактичного досягнення цим елементом нормативного ресурсу.

Розглянемо вплив роду відмов устаткування систем газопостачання на кількість запасних

частин. Розрізняють два різновиди відмов: раптові і поступові. У разі раптової відмови невідновлювані елементи в системі замінюють справними елементами з числа запасних, а елементи, що відмовили, не ремонтують. ЗІП поповнюється з фондів загального складу.

Незалежно від методики ремонту газового устаткування можуть бути здійснені три схеми забезпечення її запасними елементами [2]:

1. Нормальна, коли є одиничний і груповий комплекти запасних елементів.

2. Одиночна, коли відсутній груповий комплект запасних елементів.

3. Групова, коли відсутні одиничні комплекти запасних елементів.

Останні дві схеми є окремими випадками нормальної схеми. При відмові устаткування її несправний елемент замінюють справними з складу ЗІП. У зв'язку з цим в ЗІП якийсь час відсутній необхідний справний елемент, який поставляється з відповідного органу постачання (групового ЗІП, складу, заводу і т.д.).

Час відсутності необхідного елемента в комплекті запасних елементів назвемо часом відновлення елемента ЗІП. Він складається з часу доставки елемента, заміни його на складі і очікування заміни або ремонту.

Середній час відновлення механізму можна представити у вигляді чотирьох компонентів [3]:

$$T_{ВП} = T_{АР} + T_{ЗЧ} + T_{ОР} + T_{П},$$

де  $T_{АР}$ ,  $T_{ЗЧ}$ ,  $T_{ОР}$  – середній час відповідно активного ремонту, вимушеного простою устаткування через відсутність в ЗІП необхідних елементів (час постачання), вимушеного простою устаткування при поточному ремонті через адміністративні чинники (виклик бригади ремонту і т.д.).

Цей вираз зручніше представити у вигляді:

$$T_{ВП} = T_{ен}^* + T_{ЗЧ},$$

де  $T_{ен}^* = T_{АР} + T_{ОР} + T_n$  – середній час відновлення устаткування при необмеженому (ідеальному) комплекті ЗІП, тобто за відсутності затримки в постачанні.

У свою чергу середній час відновлення устаткування можна виразити через середній час відновлення устаткування при відмові певних елементів:

$$T_{ВП} = \sum_{i=1}^N t_{ВПi} q_i, \quad (1)$$

де  $t_{ВПi}$  – середній час відновлення устаткування при відмові  $i$ -го елемента;

$$t_{ВПi} = t_{ВПi}^* + t_{ЗЧi},$$

$t_{ВПi}^*$ ,  $t_{ЗЧi}$  – компоненти тільки для  $i$ -го елемента;

$N$  – кількість елементів в механізмі;

$q_i$  – вірогідність відмови устаткування  $i$ -го елемента при достовірному факті відмови устаткування.

Не порушуючи спільності в (1), можна перейти від конкретного елемента до групи однотипних елементів заміною  $t_{ВПi}$  на  $t_{ВПJ} q_J$

$$T_{ВП} = T_{ВП}^* + T_{ЗЧ} = \sum_{J=1}^N t_{ВПJ} q_J$$

Звідки

$$T_{ЗЧ} = \sum_{J=1}^k t_{ЗЧJ} q_J,$$

де  $k$  – кількість груп елементів в механізмі (номенклатура елементів);

$t_{ПJ}$  – середній час вимушеного простою устаткування при поточному ремонті через елементи  $J$ -ї групи;

$q_J$  – вірогідність відмови механізму через елементи  $J$ -ї групи при відмові механізму взагалі, тобто умовна вірогідність відмови устаткування через елементи  $J$ -ї групи.

Величина  $T_{ЗЧ}$  може бути прийнята за критерій достатності ЗІП. Проте ЗІП безпосередньо впливає на коефіцієнт готовності газового устаткування, яким задається в технічному завданні на апаратуру, що обумовлює необхідність пов'язати критерій достатності ЗІП з коефіцієнтом готовності механізму [6,7], який можна записати так:

$$K_G = \frac{T_P}{T_P + T_{ВП}^* + T_{ЗЧ}},$$

де  $T_P$  – напрацювання на відмову або

$$K_G = \frac{T_P}{T_P + T_{ВП}^*} \cdot \frac{T_P + T_{ВП}^*}{T_P + T_{ВП}^* + T_{ЗЧ}} = K_G^* P_D, \quad (2)$$

де  $K_G^* = \frac{T_P}{T_P + T_{ВП}^*}$  – коефіцієнт готовності устаткування при необмеженому комплекті ЗІП;

$P_D = \frac{T_P + T_{ВП}^*}{T_P + T_{ВП}^* + T_{ЗЧ}}$  – коефіцієнт забезпеченості устаткування КС запасними елементами.

З (2) слідує, що коефіцієнт забезпеченості механізму ЗІП істотно впливає на коефіцієнт готовності механізму і відображає ступінь зменшення його за рахунок ЗІП.

Таким чином, якщо середній час відновлення устаткування  $T_{ВП}$  і коефіцієнт готовності механізму  $K_G$  – критерії ремонтпридатності, то середній час простою механізму  $T_{ЗЧ}$  через ЗІП і коефіцієнта забезпеченості устаткування механізму ЗІП  $P_D$  – критерії забезпеченості устаткування запасними елементами. Для приблизного розрахунку визначення кількості запасних частин використовуємо принцип, заснований на оцінках вірогідності появи відмови в період регулярної заміни елементів.

Тривалість простою між двома регулярними або плановими оглядами залежить від надійності механізму і визначається середнім числом його відмов і часом, що витрачається на усунення цих відмов. Якщо середнє напрацювання на відмову механізму рівне  $T_0$ , то можна знайти, наскільки часто він відмовлятиме за час  $t_0$  між двома регулярними оглядами ( $T_0$  – напрацювання механізму, рівне поточному часу за

вирахуванням загальної тривалості простою). Якщо між двома регулярними оглядами на механізм не впливають відмови унаслідок зносу, і його працездатність змінюється за експоненціальним законом [3], вірогідність безвідмовної роботи між двома оглядами:

$$P(t_0) = \exp(-t_0/T_0), \quad (3)$$

Середній час між оглядами  $T_{cp}$  – обчислюють для напрацювання  $t_0$  аналогічно тому, як розраховують середнє напрацювання на відмову інтеграцією  $P(t)$  від нуля до безмежності. Середній час між оглядами фактично є середнім часом між плановими і позаплановими оглядами:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt .$$

У разі експоненціального закону:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} \exp(-t/T_0) dt = T_0 [\exp(-t/T_0)]_0^{\infty} = T_0 Q(t_0).$$

Якщо прийнята планова регулярна заміна деталей, кількість відмов через зношення може бути значно зменшена, а практично їх можна зовсім виключити, завдяки правильному вибору періоду заміни. Вірогідність того, що механізм відмовить під час роботи, різко зменшується, якщо в період між регулярними замінами елементів можуть відбутися тільки раптові відмови [2,4], число однотипних елементів, що підлягають заміні, зважаючи на відмови в період до регулярної заміни  $\tau_3$  складатиметься:

$$k = N Q(\tau_3),$$

де  $N$  – число однотипних елементів газового устаткування;

$Q(\tau_3)$  – вірогідність відмови одного елемента за період напрацювання між двома регулярними замінами ( $\tau_3$ ).

Якщо  $Q(\tau_3)$  мале і наголошуються тільки раптові відмови, може бути використане наближення:

$$Q(\tau_3) = \frac{\tau_3}{T_0} .$$

Звідси

$$k = \tau_3 \frac{N}{T_0} .$$

Точний розрахунок номенклатури і кількості запасних частин ґрунтується на обліку фізичної моделі виникнення відмов, показників безвідмовності і довговічності, а також значення регламентованої вірогідності, обслуговуючої необхідний рівень надійності виробу при регулярній заміні деталей із ЗПП.

Кількість запасних частин одиночного комплекту встановлюється розрахунковим методом залежно від характеристик для елемента причин відмови, тобто за раптовими відмовами (поломка) або за поступовими (зношення, старіння, корозія). Кількість запасних частин кожного типорозміру може бути визначене як для одного і того ж типу машин, так і для уста-

ткування різних типів, зважаючи на те, що вони володіють конструктивною спадкоємністю.

**Визначення обсягу ЗПП для невідновлюваних елементів.** Попит на запасні частини і матеріали може носити детермінований або випадковий характер. У останньому, більш загальному випадку, попит розглядають у вигляді стаціонарного процесу, описуваного розподілом Пуассона [4], який позначає вірогідність отримати  $m_i$  відмов  $i$ -го типу елементів устаткування системи газопостачання за час  $t$ , якщо інтенсивність відмов цих елементів:

$$P_{m_i, \lambda_i, t} = \frac{(\lambda_i t)^{m_i}}{m_i!} \exp(-\lambda_i t). \quad (4)$$

Вірогідність того, що число відмов  $m_i$  не перевищить числа запасних частин  $k_{3i}$ :

$$P(m_i \leq k_{3i}, \lambda_i, t) = \sum_{l=1}^{k_{3i}} \frac{(\lambda_i t)^l}{l!} \exp(-\lambda_i t). \quad (5)$$

Число  $k_{3i}$  запасних частин буде достатнім, якщо

$$P(m_i \leq k_{3i}) \geq P_D ,$$

де  $P_D$  – достатність запасних частин (близька до одиниці).

Середнє число замін елементів даного вигляду:

$$m_i = N \lambda_i t, \quad (6)$$

де  $N$  – число елементів  $i$ -го типу в устаткуванні системи газопостачання.

З (5) знаходимо сумарну інтенсивність замін конструктивних елементів

$$\Lambda_3 = N \lambda_i. \quad (7)$$

Підставивши (7) в (5), отримаємо вірогідність того, що за час  $t$  число елементів, що відмовили, не перевищить числа запасних частин  $k_{3i}$ :

$$P(m_i \leq k_{3i}) = P_3 = \sum_{l=1}^{k_{3i}} \frac{(\lambda_i t)^k}{k!} \exp(-\lambda_i t) \geq P_D. \quad (8)$$

Для зручності проведення розрахунків часто користуються іншою формулою:

$$\begin{aligned} 1 - P_3 &= 1 - \sum_{l=1}^{k_{3i}} \frac{(\lambda_i t)^k}{k!} \exp(-\lambda_i t) = \\ &= \sum_{k_3+1}^{\infty} \frac{(\lambda_i t)^k}{k!} \exp(-\lambda_i t) \geq P_D, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $1 - P_3 = P(m \geq k_3)$  – вірогідність того, що замінювана кількість елементів  $i$ -го типу буде більша від числа запасних частин  $k_{3i}$ .

Отже, якщо відомі значення  $\Lambda_3$  і  $t$ , то, задовшись достатністю запасних частин  $P_D$  можна встановити необхідну кількість запасних частин  $k_3$ .

Залежність складу ЗПП від допустимої його недостатності також очевидна. Ступінь недостатності вимірюється вірогідністю того, що число елементів, що відмовили, буде більшим

Таблиця 1 – Значення вірогідності  $P_{mi}, \Lambda_3$  залежно від  $m_i$  і  $k_{3i}$ 

$k_{3i}$	$k_{3i}=0$	$k_{3i}=1$	$k_{3i}=2$	...	$k_{3i}$
$P(m_i, \Lambda_3)$	$P_0, \Lambda_3$	$P_1, \Lambda_3$	$P_2, \Lambda_3$	...	$P_{k_3}, \Lambda_3$
$P(m_i \leq k_{3i})$	$P(m_i \leq 0)$	$P(m_i \leq 1)$	$P(m_i \leq 2)$	...	$P(m_i \leq k_{3i})$
$P(m_i > k_{3i})$	$P(m_i > 0)$	$P(m_i > 1)$	$P(m_i > 2)$	...	$P(m_i > k_{3i})$

числа елементів, що знаходяться в ЗПП для заміни. Якщо в ЗПП є два елементи, а вірогідність того, що за час  $T$  відбудеться більше двох відмов, рівна  $0,1$ , то це означає, що достатність ЗПП рівна  $0,9$ , а недостатність –  $0,1$ . Коефіцієнт достатності ЗПП  $P_D$  задається зазвичай  $0,9...0,99$ .

Запишемо процедуру визначення числа запасних частин деякого  $i$ -го типу для елементарного випадку, коли потік відмов – простий і заміновані елементи не відновлюються. Нехай інтенсивність відмов  $i$ -го типу елементів рівна  $\lambda_i$  час поповнення  $i$ -го типу елементів  $T_{inon}$ , число  $i$ -их елементів  $N_i$ , достатність ЗПП  $P_D$ .

Визначимо значення сумарної інтенсивності відмов  $i$ -го елементу

$$\Lambda_3 = \lambda_i N_i.$$

Заповнимо таблицю 1 значеннями вірогідності наступним чином. За час поповнення ЗПП  $T_{inon}$  відбудеться деяке число  $m_i$  випадкових відмов. Залежно від числа  $m_i = 0, 1, 2, 3, \dots, k_{3i}$  і числа  $\Lambda_3$  будуть мінятися  $P_{mi}, \Lambda_3$ . Другий рядок таблиці заповнюється значеннями  $P_{mi}, \Lambda_3$ , розрахованими по (4), де  $\lambda_i$  замінено  $\Lambda_3$ . Третій рядок заповнюється для кожного  $m_i$ , причому кожне значення рівне сумі всіх елементів в попередньому рядку аж до даного. Четвертий рядок – доповнення третього до одиниці.

Якщо кількість запасних частин кожного типу  $k_{3i}$  має необхідну вірогідність  $P_i$ , вірогідність достатності загальної кількості запасних частин  $P_D$  всіх типів протягом часу експлуатації устаткування буде рівна твору всієї приватної вірогідності  $P_i$ :

$$P_D = \prod P_i.$$

Необхідна кількість запасних частин для підтримки працездатності устаткування компресорних станцій магістральних газопроводів слід визначати в такому порядку. З таблиці 1 виберемо таке значення  $P_D$ , яке не менше заданого значення достатності ЗПП  $P_D$ . Число  $k_{3i}$  відповідне цьому значенню  $P_D$ , рівне числу запасних елементів в ЗПП можна також скористатися рядком таблиці. У цьому випадку  $1 - P_3$  повинне бути менше допустимої недостатності ЗПП.

Величину  $P_i$  залежно від наслідку відмови об'єкту приймають:

– при відмові з важкими наслідками, пов'язаними з небезпекою для людського життя –  $0,95...0,99$ ;

– при відмові в режимі роботи (викликає збитки від простою) –  $0,90...0,99$ ;

– при невиконанні функції в заданому обсязі (факт відмови) –  $0,95...0,96$ .

У практичних розрахунках вважають, що вірогідності можна прийняти рівними. Тоді

$$P_i = \sqrt[k]{P_D}.$$

Або наближено

$$P_i = 1 - \frac{1 - P_D}{k}.$$

Для кожного типу запасних частин устаткування систем газопостачання середня очікувана кількість відмов протягом часу  $T_p$  (час експлуатації) можна визначити так [5,6]:

$$m_i = N \lambda_{pi} T_{pi} + N \lambda_{oci} T_{oci}, \quad (10)$$

де  $\lambda_{pi}$  – інтенсивність відмов  $i$ -го елементу в робочому режимі;

$T_{pi}$  – напрацювання  $i$ -го елементу;

$\lambda_{oci}$  – інтенсивність відмов  $i$ -го елементу у відключеному режимі (режимі зберігання);

$T_{oci}$  – час очікування  $i$ -го елементу;

$N$  – кількість елементів  $i$ -го типу.

Для підтримки працездатності устаткування протягом заданого часу з вірогідністю, достатньо близькою до одиниці, кількість запасних частин кожного типу повинна відповідати не середньому очікуваному, а достатньому, щоб із заданою вірогідністю підтримати працездатність механізму.

Достатня кількість запасних частин  $k_{3i}$   $i$ -го типу визначається таким чином:

– за заданою вірогідністю знаходимо  $P_D$ ;

– знаходимо  $P_i$  для кожного типу запасних частин.

Інтенсивність відмов:

$$\Lambda_{3i} = \frac{m_i}{T_k}. \quad (11)$$

Далі використовується методика, що описана вище.

### Розрахунок кількості запасних частин відновлюваних елементів

Відмова елементу відбувається з інтенсивністю  $\lambda_i$ . Елемент, що відмовив, ремонтується і поступає на поповнення ЗПП.

Середній час ремонту з урахуванням часу на транспортування ремонтного елемента рівний  $T_{ВП}$ .

Наближена схема розрахунку ЗІП для відновлюваних елементів: визначаємо сумарну інтенсивність відмов  $\Lambda_3 = \lambda_4 N_i$ .

Заповнюємо таблицю 1 значень вірогідності того, що за час ремонту  $T_{ВП}$  відбудеться число відмов  $m_i$ , що задовольняє умові (8);

З таблиці 1 вибираємо таке значення вірогідності, яке або не менше заданого значення достатності ЗІП, або не більше заданої недостатності ЗІП. Число  $k_{3i}$ , відповідне цим значенням, рівне числу запасних елементів.

Якщо час ремонту  $T_{ВП}$  тривалий, а інтенсивність відмов велика, може статися, що для ЗІП буде потрібно велике число запасних елементів. В цьому випадку планується поповнення його елементами, що зберігаються на складах.

Поповнення ЗІП елементами потрібне тоді, коли ремонт обмежений деяким допустимим числом ремонтів відновлюваного виробу. Для ремонтної майстерні створюється ЗІП з первинних елементів, що входять до складу замінюваного елемента.

Завдання розрахунку необхідних запасних елементів полягає в тому, щоб знайти таке значення  $k_{3i}$ , яке забезпечить можливість того, що у будь-який момент хоч би один із запасних елементів знаходиться в справному стані ( $k_{3i} = 1$ ). Для забезпечення постійної працездатності агрегату необхідне дотримання співвідношення:

$$\frac{k_{pi}}{T_0} \leq \frac{n_{pk}}{T_{ВП}}, \quad (12)$$

де  $T_{ВП}$  – середній час відновлення даного елемента;

$k_{pi}$  – кількість робочих елементів даного типу, що входять до складу устаткування;

$n_{pk}$  – число ремонтних каналів, тобто кількість потоку ремонтів елементів, які можна ремонтувати одночасно (залежить від методу організації ремонтної служби на місці експлуатації обладнання);

$T_0$  – напрацювання повністю запасного елемента (її приймають рівним напрацюванню повністю робочого елемента).

Вказана умова означає, що потік відмов повинен бути меншим потоку відновлення.

Число ремонтних каналів визначається з вказаної умови наступним чином:

$$n_{pk} \geq \frac{k_{pi} T_{ВП}}{T_0}. \quad (13)$$

Співвідношення позначимо так:

$$\frac{k_{pi} T_{ВП}}{T_0} = \rho_i.$$

Тоді отримаємо  $n_{pk} \geq \rho_i$ .

Число ремонтних каналів береться за більшим значенням.

Процес забезпечення системи газопостачання запасними частинами розглянемо як завдання масового обслуговування [4]. Обслуговуюча система - ЗІП і ремонтна база. Обслуговуючий апарат - безпосередньо запасна частина. При відмові устаткування в обслуговуючу систему поступає вимога на необхідну запасну частину, яка задовольняється ЗІП. Якщо така запасна частина відсутня, то вимога стає в чергу очікування обслуговування. При цьому даний обслуговуючий апарат або ремонтний канал є зайнятим, тобто дана запасна частина знаходиться на відновленні в ремонтній базі. Після відновлення вона повертається в ЗІП на своє місце, звільняючи тим самим обслуговуючий апарат. Число обслуговуючих апаратів або ремонтних каналів -  $K$ , а довжина черги очікування -  $n$ .

Критерій оцінки системи обслуговування - необхідна вірогідність  $P_i$  - того, що у будь-який момент хоч би одна із запасних частин даного  $i$ -го типу знаходилася в справному стані, тобто коли вільний хоч би один обслуговуючий апарат.

Отже, розрахунок зводиться до визначення вірогідності того, що в механізмі будуть заповнені всі канали обслуговування і всі місця очікування відповідно до формули, відомої з теорії масового обслуговування [4]:

$$P_{n+K} = \frac{\rho^{n+K}}{K! K^n} \cdot \left( \sum_{q=0}^K \frac{\rho^q}{q!} + \frac{\rho^K}{K!} \sum_{s=0}^n \left( \frac{\rho}{K} \right)^s \right). \quad (14)$$

$$\rho_i = \frac{\Lambda_3}{\mu \beta} - \text{відношення параметра потоку}$$

відмов устаткування до інтенсивності відновлення.

$$\text{Тут } k_{3i} = K + n.$$

В результаті розрахунку набудуть значення вірогідності того, що всі запасні частини агрегату знаходяться на відновленні або чекають ремонту. Тоді необхідно розрахувати таке значення  $P_i$ , при якому величина  $P_{n+K}$ , знайдена по (14), задовольняла б співвідношенню:

$$P_i = 1 - P_{n+K} \geq P_D.$$

Розрахунок необхідної кількості запасних частин зручно проводити за допомогою номограм, які будуються таким чином:

– по осі ординат відкладають значення вірогідності  $P_i$ ;

– по осі абсцис – значення  $\rho_i$ .

Будують сімейство кривих залежності  $P_i$  від  $\rho_i$ , використовуючи (14) для кожного фіксованого  $n_{pk}$  і  $m=0,1,2$ , що змінюються. Тоді кожна крива відповідатиме певній кількості запасних частин  $k_{3i} = n + n_{pk}$ , а все сімейство - заданому числу ремонтних каналів  $n_{pk}$ .

Розрахунок необхідної кількості запасних частин виконують на підставі початкових даних:

$$\frac{k_{pi} T_{ВП}}{T_0} = \rho_i.$$

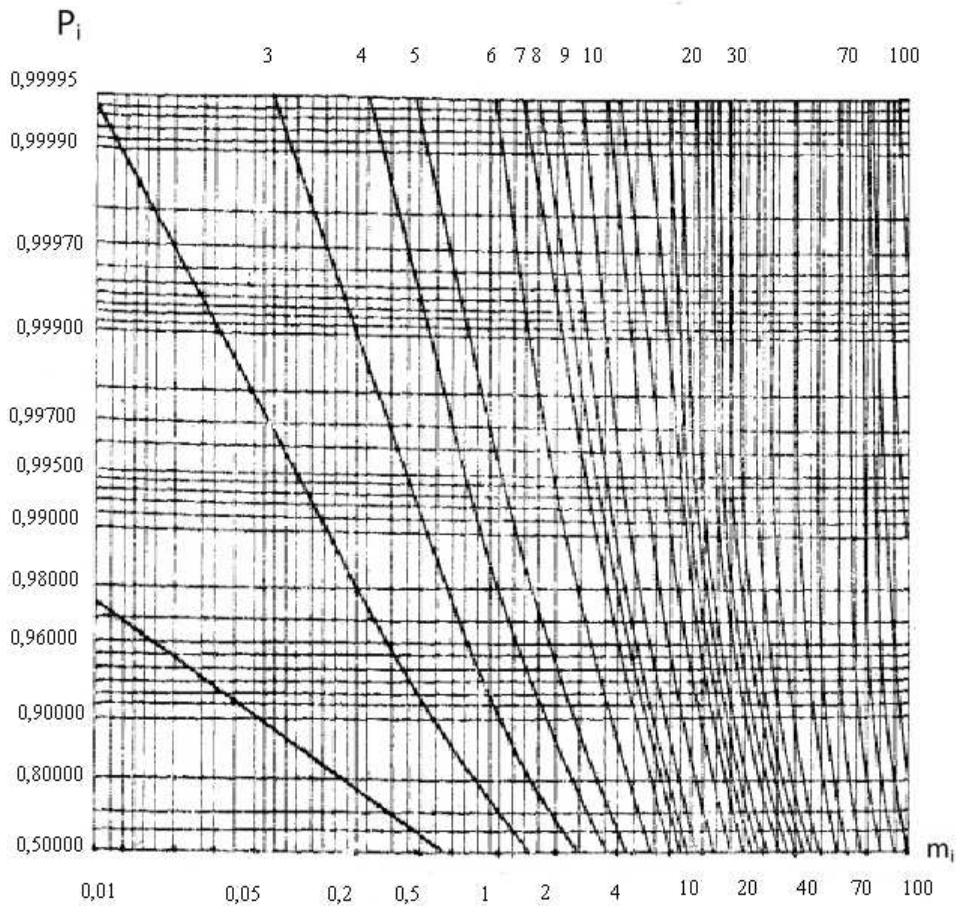


Рисунок 1 – Номограма 1

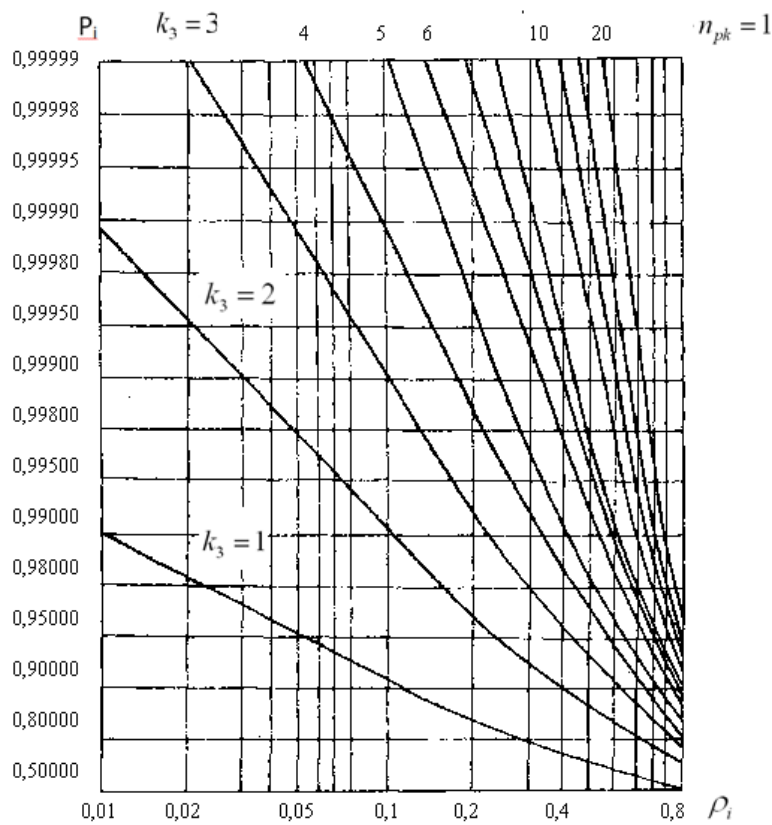


Рисунок 2 – Номограма 2

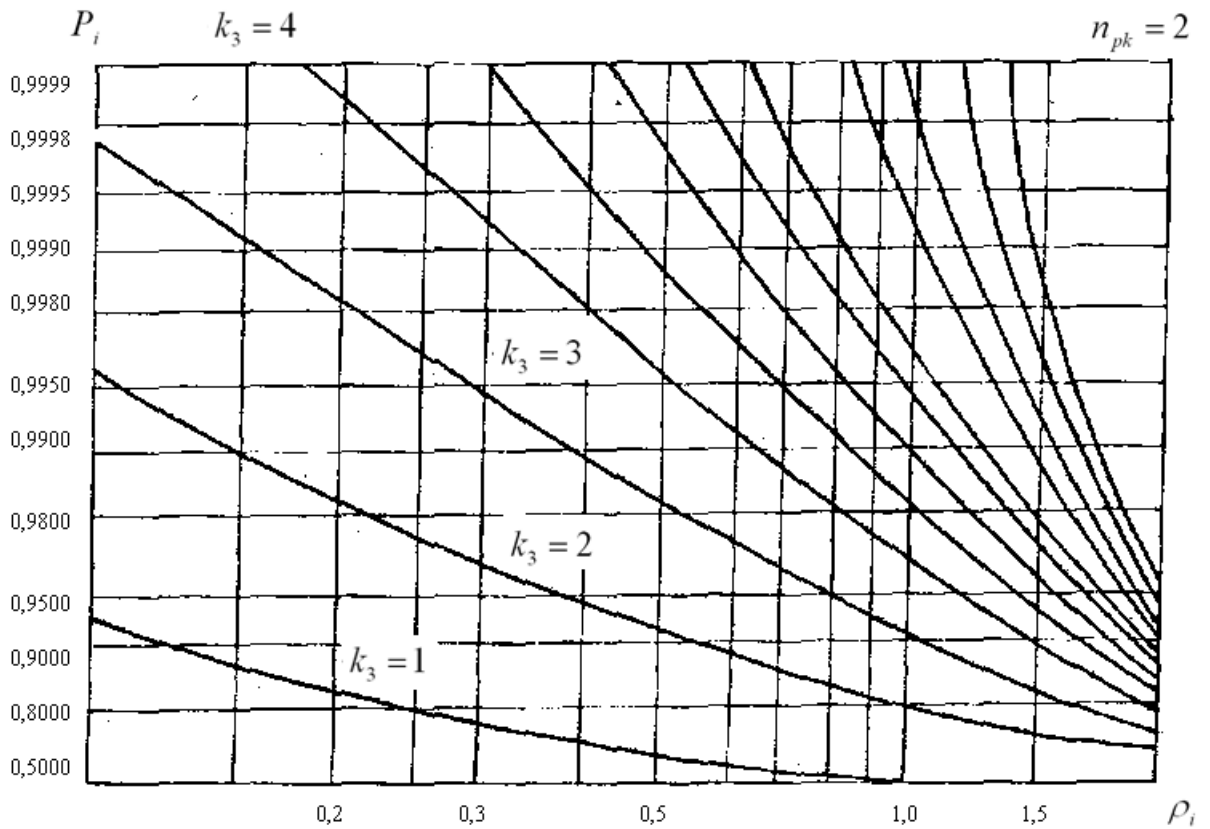


Рисунок 3 – Номограма 3

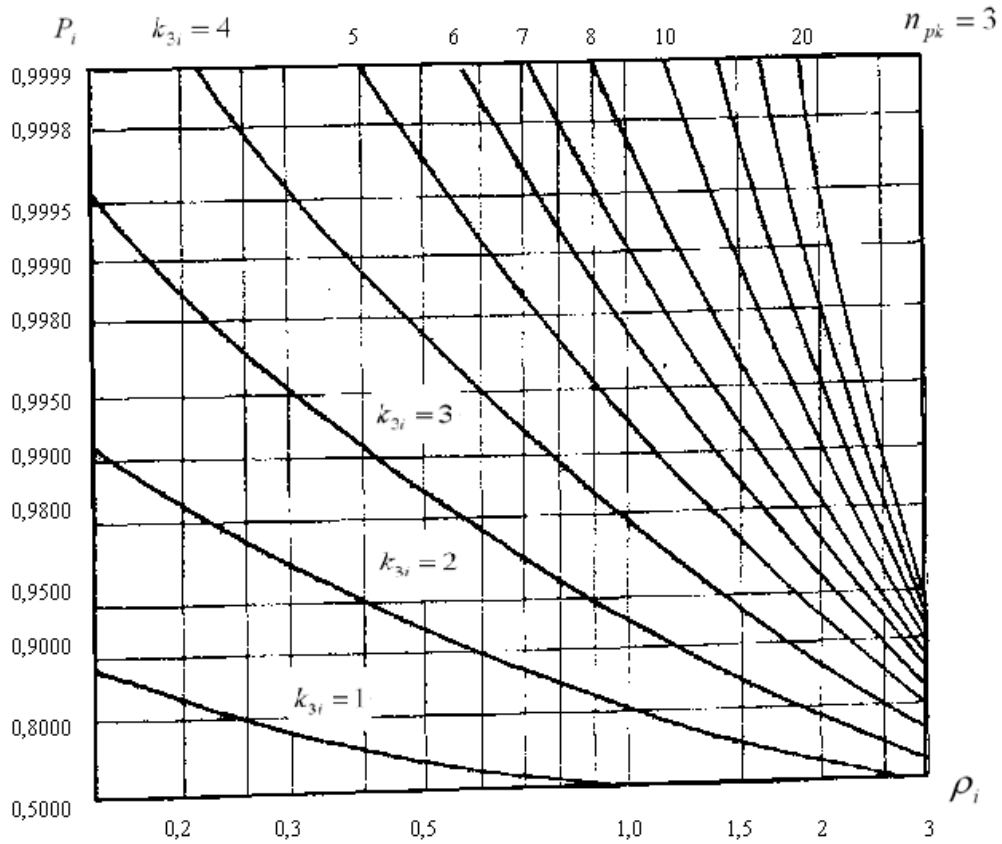


Рисунок 4 – Номограма 4



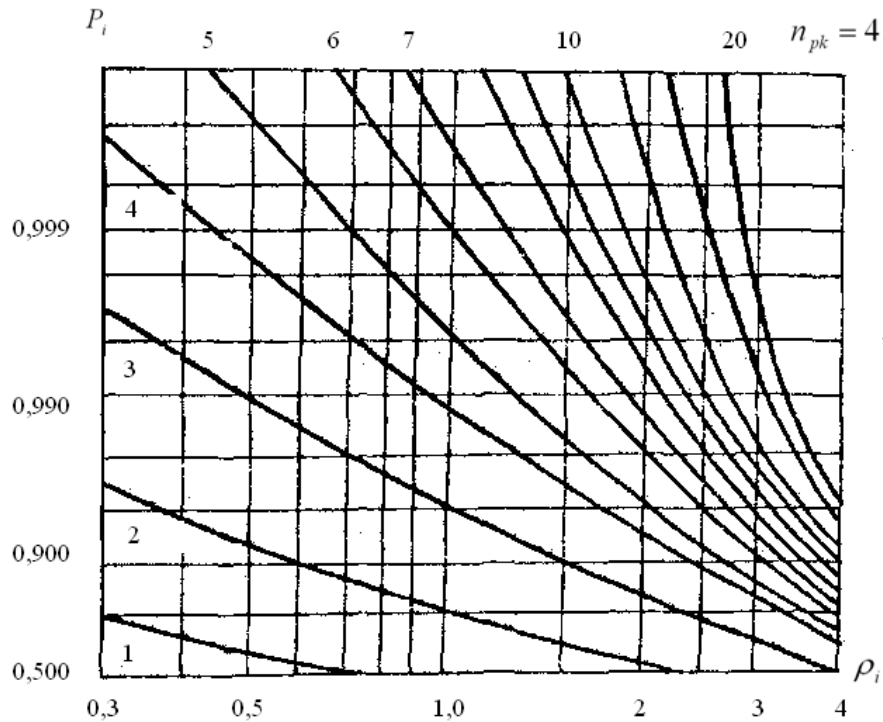


Рисунок 5 – Номограма 5

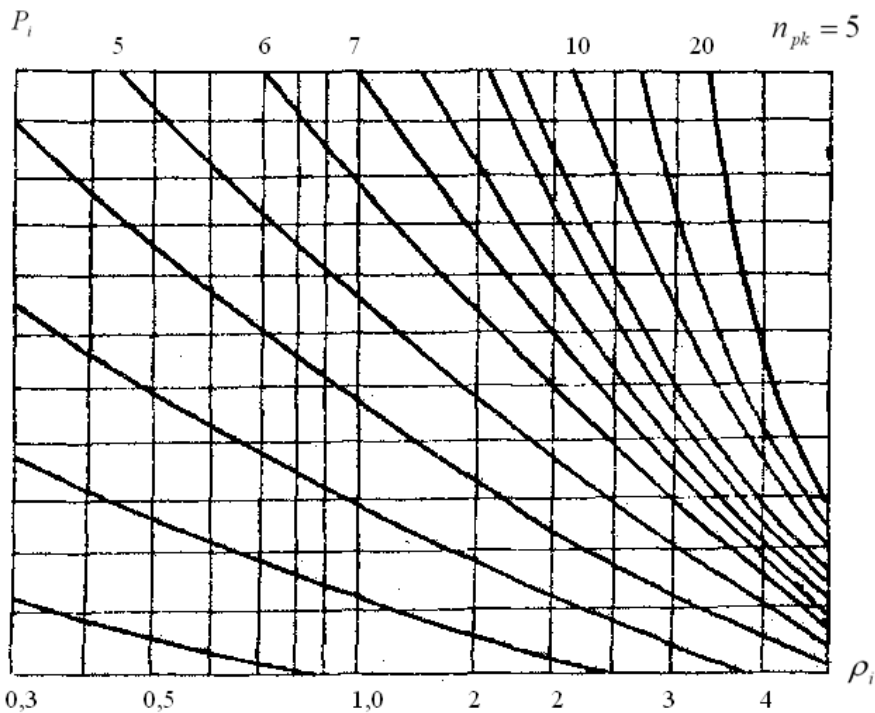


Рисунок 6 – Номограма 6

За номограмами, відповідних заданій кількості ремонтних каналів  $n_{pk}$  і заданої величини  $P_i$ , визначають відповідну кількість запасних частин  $k_{zi}$ , яке береться за найближчою кривою точки, що проходить вище  $(\rho_i, P_i)$ .

Визначимо кількість запасних частин в газотранспортних системах з урахуванням поступових відмов елементів устаткування.

Поступовою відмовою елементів називається відмова, що виникла в результаті поступової зміни значень одного або декількох основних параметрів системи. В результаті елемент втрачає працездатність унаслідок зміни робочого параметра.

Необхідними даними для розрахунку сумарного напрацювання елемента устаткування в заданому періоді  $T_k \in T_{p1}, T_{p2}$  - напрацювання

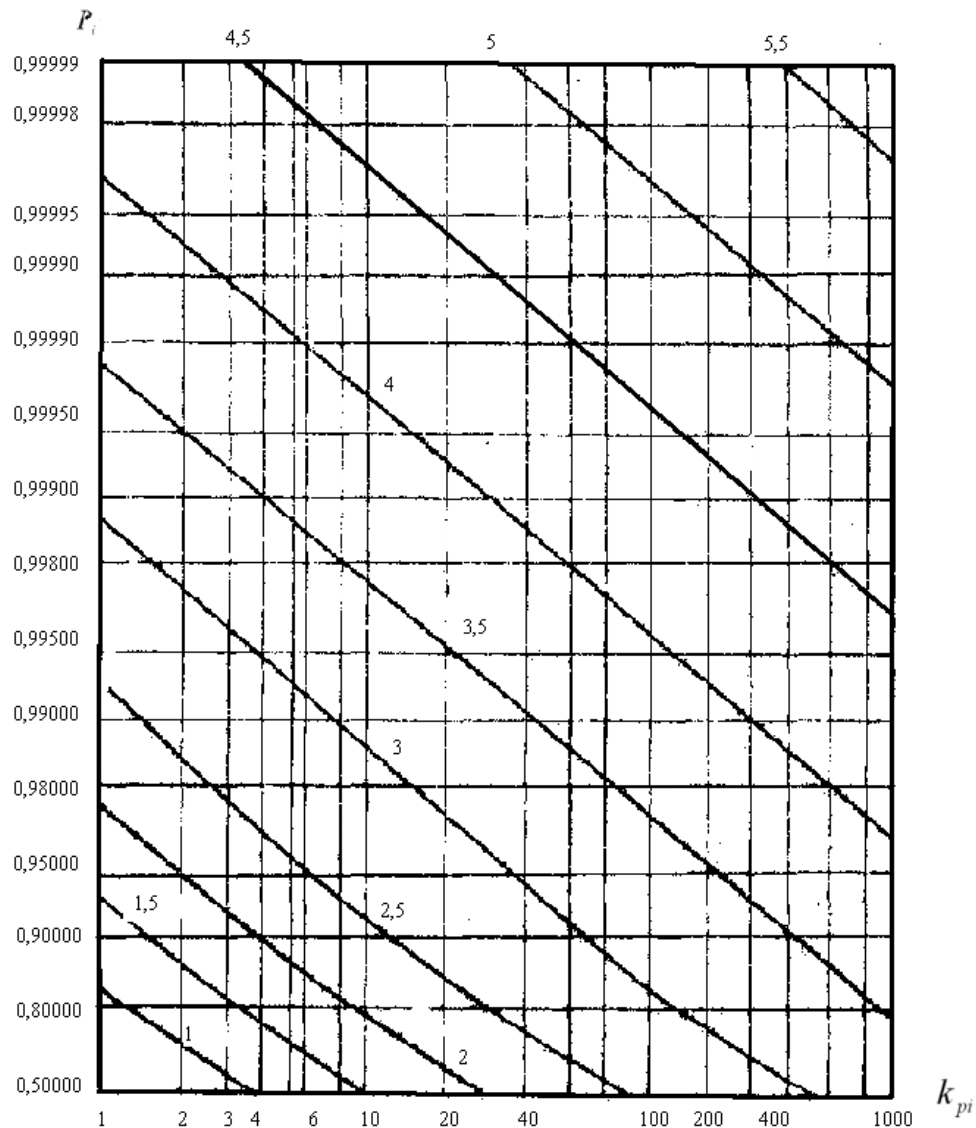


Рисунок 7 – Номограма 7

елементу відповідно до першого пошкодження (до певного рівня зміни робочого параметра), і від першого до другого пошкодження, і тому подібне.

Загальний час роботи елемента зазвичай приймають у вигляді

$$T_p = T_{p1} + T_{p2} + \dots + T_{pi}$$

де  $T_1, T_2$  – випадкові незалежні величини, що мають однакові розподіли.

Під час експлуатації спостерігаються два випадки:

1) середній ресурс елемента до списання  $T_{pc}$  більше розрахункового робочого часу (середнього ресурсу виробу до капітального ремонту)  $T_{pkr}$ , тобто  $T_{pc} > T_{pkr}$ . У цьому випадку можна припускати, що за час  $T_{pkr}$  потрібно замінити тільки деяку частину основних робочих деталей, що входять в систему, кількісно визначених дисперсією напрацювання (ресурсу) власне деталей;

2) середній ресурс елемента  $T_{pc}$  до списання менше розрахункового часу  $T_{pkr}$ , тобто  $T_{pc} \leq T_{pkr}$ . В цьому випадку за час  $T_{pkr}$ , потрібна

неодноразова заміна всіх робочих деталей агрегату, причому кількість таких замінь буде тим більша, чим більша величина співвідношення  $T_{pkr} / T_{pc}$ .

**Метод розрахунку запасних частин для випадку  $T_{pc} > T_{pkr}$**

Для визначення  $m_i$  розраховують допоміжну величину  $K$ :

$$K = \frac{T_{pc} - T_{pkr}}{\sigma_i} = \frac{T_{pc} - T_{pkr}}{VT_{pc}},$$

де  $V$  – коефіцієнт варіації (за відсутності даних 0,3).

За знайденою величиною  $K$  і значенням  $K_{pi} = 1$ , згідно номограми 7, знаходять вірогідність безвідмовної роботи однієї деталі  $P_{il}$  за час  $T_{pkr}$

$$q_{il} = 1 - P_{il}. \quad (15)$$

Середня очікувана кількість відмов деталей в механізмі за час  $T_{pkr}$

$$m_i = q_{il} K_{pi}. \quad (16)$$

За номограмою 3 для отриманого значення  $\rho_i$  і заданій вірогідності  $P_i$  знаходять необхідну кількість запасних частин  $k_{3i}$ .

Другий випадок, коли середній ресурс до списання елементу  $T_{pc} \leq T_{ркр}$ . Тоді середня очікувана кількість відмов за час  $T_{ркр}$

$$m_i = K_{pi} T_{ркр} / T_{pc}$$

Далі за цією ж номограмою для даного значення  $m_i$  і заданою вірогідністю  $P_i$  визначають  $k_{3i}$ .

Для дорогих елементів агрегатів, що не мають резерву, вибір значення величини  $P_d$  може істотно вплинути на вартість змісту агрегатів в працездатному стані. Дійсно, із збільшенням об'єму запасу на складі, супроводжуючого збільшенням вірогідності задоволення попиту, одночасно збільшується об'єм засобів, омертвлених в запасах. Питання оптимізації об'ємів запасів розглядаються в теорії управління запасами, яка дає наступний вираз функції витрат:

$$C = C_3 \sum_{m=0}^{k_3-1} (k_3 - m)P(m) + C_4 \sum_{m=k_3}^{\infty} (m - k_3)P(m), \quad (17)$$

де  $C_3$  – питомі (віднесені до однієї одиниці зберігання) витрати, пов'язані з постачанням і зберіганням запасу на складі;

$P(m)$  – вірогідність відмови  $m$  деталей за час  $t$ ;

$C_n$  – питомі (віднесені до однієї одиниці зберігання) збитки від простоїв агрегату через брак деталей на складі.

Перший член (17) є математичним очікуванням витрат, пов'язаних з постачанням і зберіганням запасу на складі; другий – математичне очікування збитків від простоїв агрегатів через брак там деталей.

Оптимальна величина запасу  $k_{3onm}$  відповідна мінімуму функції визначається при відомих значеннях величин  $C_3$  і  $C_n$  за умови:

$$P(m \leq (k_{3onm} - 1)) \leq E \leq P(m \leq k_{3onm}). \quad (18)$$

Причому

$$E = \frac{C_n}{C_3 + C_n}.$$

З (18) видно, що показник  $E$ , по суті, оцінює економічно обґрунтований рівень вірогідності забезпечення достатності запасних елементів  $P_{Donm}$ . Практично можна прийняти

$$E = P_{Donm}$$

або

$$E = P(m \leq k_{3onm}).$$

При спрощених розрахунках питомі витрати  $C_3$  можна приймати вартість деталі, а питомі збитки  $C_n$  оцінювати твором середнього значення годинної собівартості елементів, що відмовили, за час простою через відсутність запасних деталей на складі.

Таким чином, приведені принципи вибору обсягу запасних частин під час експлуатації систем газопостачання для випадків відновлю-

вальних і не відновлювальних елементів дали змогу створити методику, яка містить засади формування номенклатури як перелік номерів і найменувань запасних інструментів та приладдя, складений в певному групуванні і послідовності, критерії оцінки достатності комплекту запасних частин, які вибрано з умови достатньої надійності процесу експлуатації системи, засновану на оцінках вірогідності появи відмови в період регулярної заміни елементів. Показано, що попит на запасні частини і матеріали носить випадковий характер і розглядається у вигляді стаціонарного процесу, описуваного розподілом Пуассона. Принцип розрахунку зводиться до визначення вірогідності того, що в механізмі будуть заповнені всі канали обслуговування і всі місця очікування відповідно до теорії масового обслуговування.

### Література

- 1 Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание / Ф. Байхельт, П. Франкен // Математический подход; пер. с нем. – М.: Радио о связь, 1988. – 392 с.
- 2 Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е.Ю.Барзилович. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.
- 3 Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
- 4 Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко; 2-е изд. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
- 5 Грудз В.Я. Обслуживание газотранспортных систем / В.Я. Грудз, Д.Ф.Тымкив, Е.И. Яковлев. – Киев, 1991. – 160 с.
- 6 Грудз В.Я. Обслуживания і ремонт газопроводів / В.Я. Грудз, Д.Ф. Тимків, В.Б. Михалків, В.В. Костів. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – 711 с.
- 7 Ставровский Е.Р. Методы расчета надежности магистральных газопроводов / Е.Р. Ставровский, М.Г. Сухарев, Н.М. Карасевич. – Новосибирск: Наука, 1982, – 92 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
11.04.14

Рекомендована до друку  
професором **Сердюк М.Д.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук **Банахевичем Ю.В.**  
(управління МГ і ГРС ПАТ «Укртрансгаз»,  
м. Київ)