

УДК 691.307

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-93-100

РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ КС ЗА ТИПОМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ З'ЄДНАНЬ ГПА ЗАСОБАМИ БЛОЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Д. Ф. Тимків, А. В. Семенчук, О. С. Царева, Т. О. Ваврик

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул.
Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: a.if.ua1981@gmail.com*

Одним зі шляхів вирішення проблеми ефективного використання енергоресурсів у сучасних умовах є зменшення витрат газу в процесі його транспортування; повна утилізація тепла на компресорних станціях магістральних газопроводів. Для ГТС характерні багаторівневість мережевої структури, значні розміри та часи релаксації збурень, розподілені та дискретні керуючі впливи, високий ступінь невизначеності як внутрішніх параметрів, так і зовнішніх чинників. ГТС обмінюється з довкіллям масою, імпульсом і енергією. Окремі складові ГТС взаємодіють між собою, а тому зміна режиму роботи окремої ділянки веде до зміни режиму всієї системи. Розрахунок параметрів функціонування таких систем є складною математичною проблемою. Її розв'язання вимагає побудови адекватних математичних моделей окремих об'єктів ГТС і розробки відповідних алгоритмів для забезпечення необхідної точності обчислень параметрів схеми з'єднань газоперекачувальних агрегатів (ГПА). Загалом, для встановлення робочих параметрів ГПА проводять розрахунок: режимноенергетичних параметрів (тиск і температуру газу на виході ГПА, а також затрати паливного газу); параметрів газового потоку на виході нагнітача; області допустимих змін параметрів ГПА; продуктивності нагнітачів і частоти обертів, за яких забезпечується перекачування газового потоку із заданими режимними параметрами; параметрів технічного стану нагнітачів і їх приводів згідно замірених даних. У даній статті для розрахунку вибрано такий параметр як надійність. Основну увагу зосереджено на умові, пов'язаній з оцінкою ефективності роботи КС. Визначено коефіцієнт готовності: з одного боку, з чисто імовірних і технічних позицій, з іншого – позицій показника ефективності роботи об'єкту, ґрунтуючись на усереднених величинах. Наведено необхідні розрахункові співвідношення для визначення коефіцієнта продуктивності, ймовірності станів і інших допоміжних величин для ряду технологічних схем, представлених у статті. Проведено висновки результатів реалізації математичної моделі засобами блочного програмування, доведено адекватність моделі. Продемонстровано один зі способів застосування моделі для вибору оптимального типу з'єднання ГПА при проектуванні нових КС.

Ключові слова: математичне моделювання, надійність, компресорні станції, газоперекачувальний агрегат, математичне очікування

One of the ways to solve this problem of efficient use of energy resources in modern conditions is to reduce gas consumption in the process of its transportation; full utilization of heat at compressor stations of main gas pipelines. GTS is characterized by the multi-level network structure, significant dimensions and relaxation times of the disturbance, distributed and discrete control influences, and a high degree of uncertainty of both internal parameters and external factors. GTS exchanges mass, momentum and energy with the environment. Separate components of the GTS interact with each other, and therefore a change in the mode of operation of a separate section leads to a change in the mode of the entire system. Calculation of parameters of functioning of such a system is a complex mathematical problem. Its solution requires the construction of adequate mathematical models of individual GTS objects and the development of appropriate algorithms to ensure the necessary accuracy of calculations of parameter schemes from combined gas pumping units (GPUs). In general, in order to establish the working parameters of the HPA, the following calculations are carried out: mode and energy parameters (gas pressure and temperature at the HPA outlet, as well as fuel gas consumption); gas flow parameters at the supercharger outlet; areas of permissible changes in parameters of the GPA; the performance of the superchargers and the frequency of revolutions at which the pumping of the gas flow with the given operational parameters is ensured; parameters of the technical condition of superchargers and their drives according to the measured data. In this article, such a parameter as reliability is selected for calculation. The main attention is focused on the conditions related to the evaluation of the effectiveness of the work of the CS. Readiness coefficients were determined: on the one hand, from purely probabilistic and technical positions, on the other - a positional indicator of the object's work efficiency, based on average values. Provision of

estimated sums for determining productivity coefficients, state probabilities and other auxiliary values for a number of technological schemes presented in the articles is given. The conclusions of the results of the implementation of the mathematical model using block programming were drawn, and the adequacy of the model was proven. One of the methods of applying the model for choosing the optimal type of connection of the HPA in the design of new CSs is demonstrated.

Key words: mathematical modeling, reliability, compressor stations, gas pumping unit, mathematical expectation

Вступ

В Україні діє складна система взаємозв'язаних магістральних газопроводів. Лінійні ділянки (ЛД), які з'єднані трубами-перемичками з встановленими на них кранами, одно- чи багатощаблеві компресорні станції (КС) з однотипними чи різнотипними газоперекачуючими агрегатами (ГПА), що оснащені арматурою регулювання тиску, витрат, зміни поперечного перерізу трубопроводу тощо, та інші технологічні елементи газопроводів утворюють цілісний інженерний об'єкт. Тому зміна режиму роботи окремої ділянки зумовлює зміни режиму роботи всієї системи.

Аналіз останніх досліджень. Однією із найважливіших проблем при експлуатації газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу визначають забезпечення їх стійкої роботи [1]. Оскільки газотранспортна система України є керованим об'єктом, то управління газопотоками здійснюється зміною: стану запірної арматури, продуктивності газоперекачувальних агрегатів, параметрів джерел та відборів газу тощо [2]. Зміну необхідно проводити за визначеними розрахунковими параметрами, для цього застосовується, зокрема, математичне моделювання для обчислень параметрів робочого процесу, які можуть збігатися з окремими обчисленнями, виробленими при виконанні розрахунків [3].

Математичне моделювання активно застосовується для вирішення прикладних і проектних задач щодо роботи ГТС за різних умов, в тому числі для моделювання можливості зменшення кількості паралельно працюючих

газоперекачувальних агрегатів на кожній компресорній станції; дослідження зміни конфігурації мережі та режимів роботи компресорних станцій та іншого технологічного обладнання, за яких перехід з одного заданого режиму роботи ГТС на інший відбудеться із забезпеченням певного критерію або критеріїв; дослідження технічного стану трубопроводів [4-8].

Виділення раніше не вирішеної частини проблеми. У технічних системах, зазвичай, після виходу з ладу її елементів проводяться ремонтні роботи, підганяються відповідні параметри до встановлених інструкцією з експлуатації. В таких випадках момент повної готовності [9] є тоді, коли всі елементи системи в працездатний стан за час, не більший заданого. Цей стан не сприяє зниженню ефективності роботи системи і, як правило, визначається коефіцієнтом повної готовності K_{n2} [9].

Таким чином, за розрахованим коефіцієнтом повної готовності можна здійснити вибір оптимальної схеми ГПА, перевірити правильність якого можна за відповідністю коефіцієнта продуктивності, вираженого через початкові (тобто попередньо задані) показники надійності, коефіцієнту продуктивності, вираженого через коефіцієнт ймовірності [9]. Під коефіцієнтом повної готовності розуміємо [9] такий стан готовності усіх елементів ГПА, коли відсутні часткові відмови, тобто КС повністю знаходиться в працездатному стані.

Мета дослідження Більшість газопроводів України мають значний термін експлуатації. Тому вони потребують перевірки на показники надійності.

Поставлена мета може бути досягнута внаслідок розв'язання таких задач як визначення вибраних показників надійності КС для різних схем з'єднання ГПА; реалізація математичної моделі розрахунку основних параметрів засобами блочного програмування для перевірки її на адекватність (відповідність отриманих розрахунків теоретичним даним); виявлення відповідності отриманого коефіцієнта повної готовності коефіцієнтам продуктивності, виражених через початкові показники надійності і ймовірності відповідно, для вибору оптимальної схеми КС.

Висвітлення основного матеріалу

Введено [9] наступні обмеження, які носять технологічний характер і впливають на надійність роботи КС (мається на увазі теоретична модель КС, якій може відповідати будь-яка реальна):

- всі (робочі і резервні) ГПА однотипні і їх початкові характеристики надійності однакові;
- відключення ГПА як в аварійних, так і в планових ситуаціях відбувається миттєво (тобто не розглядається поступовість (поопераційність) відключення (включення) ГПА);
- закони розподілу вірогідності часу безвідмовної роботи і відновлення є пуассонівськими, при переході на інший тип ГПА змінюються тільки початкові характеристики;
- завантаження паралельних групи агрегатів пропорційне;
- резерв на КС є ненавантаженим;
- «перекіс» схеми, що виникає під час імітації відмови, при вичерпанні резервів усувається відключенням додаткових ГПА.

Коефіцієнт готовності за своїм призначенням характеризує не тільки підготовленість системи до роботи, але й її ефективність. Тому, пов'язуючи готовність системи з вихідними ефектом (тобто роботою в повністю працездатному стані),

можна цей ефект охарактеризувати коефіцієнтом готовності

$$H_w = \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i p_i, \quad (1)$$

де β_i – відношення продуктивності i -го стану до заданої (номінальної);

p_i – ймовірність виникнення i -го стану;

Коефіцієнт часткової готовності [9], визначений для сприятливих станів з частковими відмовами, може оцінюватися в різний спосіб. Ми пропонуємо два визначення коефіцієнта часткової готовності (коли присутні часткові відмови обладнання ГПА, тобто КС знаходиться в працездатному стані лише частково, причому зберігаючи часткову ефективність). Перше - за ймовірністю настання часткової працездатності системи за умови наявності часткових відмов (або за ефективністю системи при наявності часткових відмов). Друге - математичне очікування, реалізоване в математичній моделі.

У першому випадку коефіцієнт готовності є ймовірністю того, що система працює з частковими відмовами, які дозволяють використовувати систему за призначенням зі зниженою ефективністю. У другому – коефіцієнт часткової готовності є відношенням математичного очікування показника ефективності до номінального його значення при часткових відмовах, що дозволяють використовувати систему за призначенням зі зниженою ефективністю. Це визначення є більш зручним для використання, оскільки повністю відповідає коефіцієнту продуктивності.

Коефіцієнт ефективності чисельно рівний коефіцієнту повної готовності, тобто $H_w = p_0 = K_{n2}$ за умови, що $m=1, \beta_0=1$. Оскільки коефіцієнт ефективності для газотранспортних систем (тобто і для газопроводів, і КС) виражається безпосередньо через продуктивність, введемо ще один показник – коефіцієнт продуктивності [9].

При технічній підготовці елементів системи може виявитися, що до роботи будуть не готові тільки деякі елементи. Але оскільки система не може залишатися повністю відключеною, доцільно, щоб вона працювала при неповному складі елементів, тобто за неповної або часткової готовності, що утворюють єдину математичну модель.

За повної готовності коефіцієнт виражається чисельно однією і тією ж величиною [9] (при $m=1$, $\beta_0 = 1$, $H_w = M\{\beta\} = 1 \cdot p_0 + (1-p_0) \cdot 0 = p_0 = P_{nz} = \pi$).

Проаналізуємо основні схеми з'єднання агрегатів, які використовуються при проектуванні КС, і виведемо відповідні розрахункові формули математичної моделі.

Визначаємо коефіцієнт повної готовності КС для простого випадку, коли є тільки один компресор і одна ремонтна бригада (Сх I:1+0).

Параметри процесу λ_k μ_k задаються формулами:

для навантаженого резерву (резервні елементи працюють)

$$\lambda_k = (n - m - k)\lambda;$$

$$\mu_k = \begin{cases} k\mu, & k \leq r \\ r\mu, & k > r \end{cases}; \quad (2)$$

для ненавантаженого резерву (резервні елементи не працюють)

$$\lambda_k = \begin{cases} \lambda n, & k \leq m \\ n + m - k, & k > m \end{cases}. \quad (3)$$

Задається ймовірність початкових станів процесу $p_k(0)$.

У теорії ймовірності доводиться, що для будь-якого початкового стану процесу існують межі $\lim_{t \rightarrow \infty} p_k(t) = p_k$

Кінцева ймовірність p_k рівна середньому часу, коли k елементів – несправні і виражається через інтенсивність відмов і відношення за (4). Для системи тривалої дії процес достатньо повно описується параметрами p_k :

$$p_k = \frac{\theta_k}{\sum_{k=0}^N \theta_k}, \quad (4)$$

$$\text{де } \theta_k = \frac{\lambda_0 + \lambda_1 \dots \lambda_{k-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_k}; k = 0; \theta_0 = 1$$

Величина θ_k зі збільшенням числа k спершу зростає, а потім спадає.

Припустимо, що параметри λ і μ є заданими для компресорних агрегатів.

Фінальна ймовірність:

$$n = 1, m = 0, r = 1, \text{ тобто } \lambda_0 = \lambda; \mu_1 = \mu \text{ далі}$$

$$\theta_0 = 1; \theta = \frac{\lambda}{\mu} \text{ і } p_0 = \frac{1}{1 + \lambda/\mu}, p_0 \frac{\lambda}{\mu} p_0 \quad (5)$$

Оскільки p_0 – ймовірність того, що елементів, які вийшли з ладу, немає (він один), то приймаємо за P_{kc} величину p_0 . Отже,

$$P_{nz} = \frac{\lambda}{\mu} p_0 \quad (6)$$

Варто зазначити, що для більш складних випадках коефіцієнт готовності необхідно щоразу визначати.

Нехай на компресорній станції (рис.1) встановлено чотири компресори за схемою: Сх II:4+0. Робиться припущення, що ремонтна бригада одна. Режим роботи такий [9]: якщо вийшов з ладу один (будь-який) ГПА, то для уникнення «перекоосу» в з'єднанні двох груп ГПА відключається й інший, сполучений послідовно. При виході з ладу двох (будь-яких) агрегатів ті що залишилися, працюють як послідовна пара. В обох випадках вважається, що продуктивність вдвічі менша, ніж в безаварійній ситуації. Якщо з ладу вийшли три компресори, то станцію вважають такою, що повністю вийшла з ладу.

За цією характеристикою перший випадок відповідатиме сприятливому стану, другий – несприятливому.

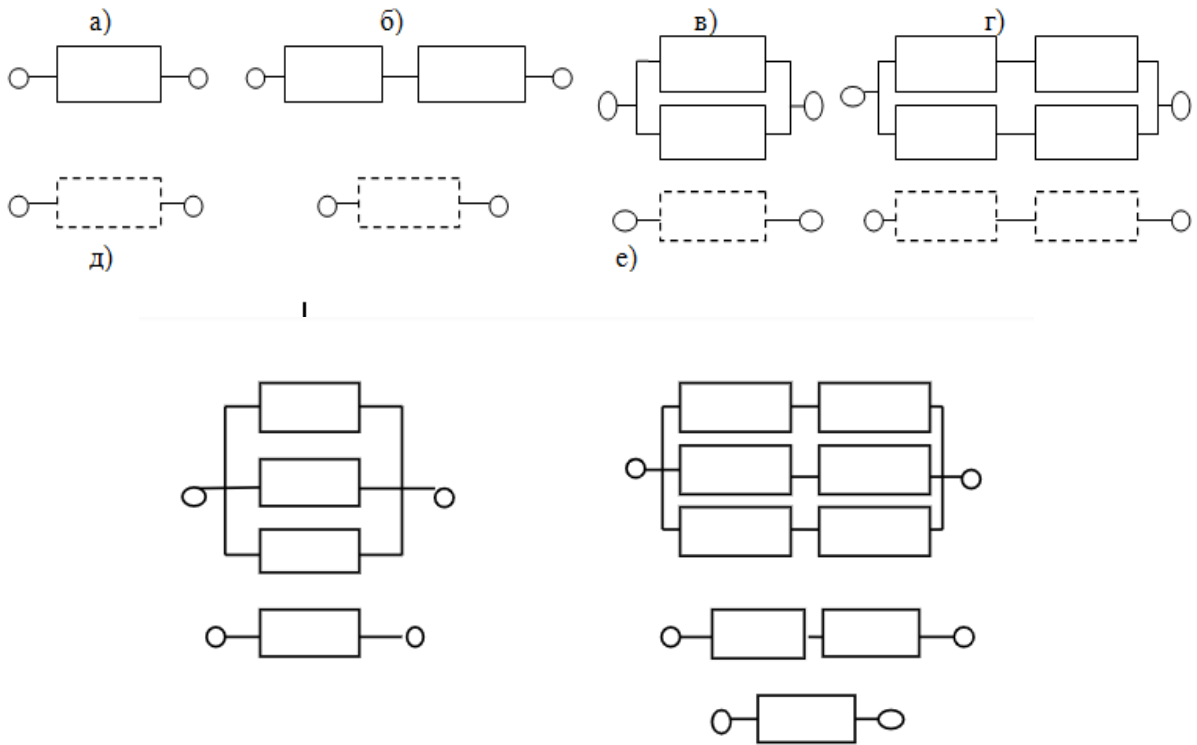
Оскільки через P_k позначили вірогідність стану при відмові k елементів, то за показник ефективності роботи КС приймається коефіцієнт продуктивності [9] у вигляді співвідношення:

$$\pi_{kc} = p_0 + \beta_1 p_1 + \beta_2 p_2,$$

де для даної схеми КС $\beta_1 = \beta_2 = 0,5; p_0 = P_{КС}$.

При виході з ладу одного агрегату відключенням другого ми порушуємо точну умову процесу загибелі і розмноження. У розрахунках ця неточність нехтується, оскільки вона не впливає на результат. Використовуючи формули (3) і (4) при $n=4$,

$m=0, r=1$, обчислюємо (вважаючи $v = \frac{\lambda}{\mu}$) величини $\theta_0=1, \theta_1=4v, \theta_2=12v^2, \theta_3=24v^3, \theta_4=24v^4$, і ймовірність $p = \frac{1}{1+4v+12v^2+24v^3+24v^4}; p_i = \theta_i p, i=1,2,3$ (8)



a) - Cx I: 1+1; б) - Cx II: 2+1; в) - Cx I 2+1; г) - Cx II: 4+2
 д) - Cx I: 3+1; е) - Cx II: 6+2+1

Рисунок 1 – Основні схеми з'єднання ГПА на одноцехових КС [9]

Введемо співвідношення, за умови, що в резерві один ГПА (СХ II 4+1). Тобто, $n=4, m=1, r=1, \theta_1=4v, \theta_2=16v^2, \theta_3=48v^3, \theta_4=96v^4, \theta_5=96v^5$,

Як і раніше,

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^3 \theta_i}, p_i = \theta_i p_0, i=1,2,3 \quad (9)$$

За коефіцієнт продуктивності приймаємо

$$\pi_{КС} = \sum_{i=0}^3 \beta_i p_i, \quad (10)$$

де

$$\beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = 1, \beta_3 = \beta_4 = 0,5, P_{\text{ен}} = p_0 + p_1 + p_2$$

Причому p_1 легко підрахувати, оскільки

$$\theta_0 = 1, \theta_1 = 4v, \theta_2 = 16v^2, \theta_3 = 64v^3,$$

$$\theta_4 = 192v^4, \theta_5 = 384v^5, \theta_6 = 384v^6$$

Тут

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^4 \theta_i}, p_i = \theta_i p_0, i=1, \dots, 4 \quad (11)$$

Відношення інтенсивності і відновлення представлене через
$$\nu = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{T_b}{T_p}$$
 (число відмов час відновлення). Числові значення для агрегатів деяких типів за даними статистики наступні: ГТК-10-2 $\nu=0,003$; ГТК-10-4 $\nu=0,0227$; ГТН-16 $\nu=0,09289$; ГТНР-10 $\nu=0,0593$; ГТК-25i $\nu=0,02145$; ГТК-10i $\nu=0,0764$. Таким чином, було отримано ряд формул для розрахунку показників надійності найбільш поширених схем з'єднання ГПА на компресорних станціях [9].

Реалізуємо математичну модель за допомогою блочного програмування (VBA Excel).

I блок – розрахунок відношення інтенсивності й відновлення, порівняння математичних розрахунків зі статистичними. Для подальшого розрахунку

обираємо саме статистичні дані (для більшої універсальності моделі).

II блок – розрахунок коефіцієнту повної готовності за умови настання першого та другого випадків.

III блок – розрахунок коефіцієнту продуктивності за математичним очікуванням та імовірністю.

Формуємо графічні залежності на основі аналізу отриманих результатів (рис. 2), які дозволяють прогнозувати й аналізувати роботу системи в цілому за розрахованими показниками надійності.

За показником коефіцієнту повної готовності можна визначити найбільш оптимальну схему з'єднання ГПА (рисунок 1), за якої зберігається працездатність цілої системи навіть за умови настання першого та другого випадків.

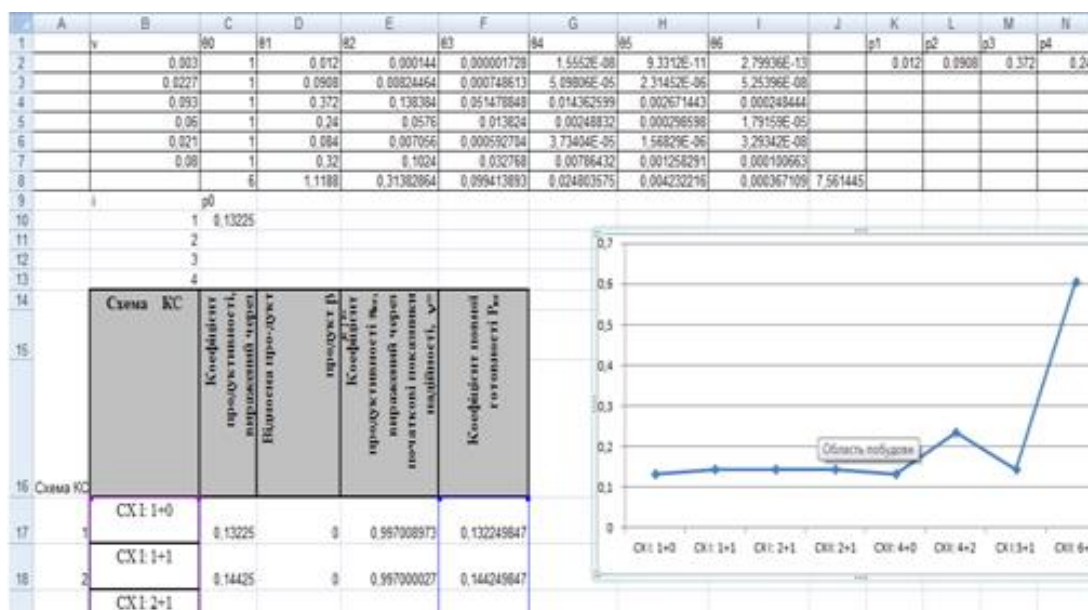


Рисунок 2 – Фрагмент вікна блочної програми з аналізом отриманих результатів

Перевірити правильність вибору можна, визначивши відповідність коефіцієнту продуктивності за математичним очікуванням (початкові показники надійності) коефіцієнту продуктивності за імовірністю (рис. 3).

У результаті аналізу графічної залежності розрахованих показників

виявляємо відповідність показника повної готовності тієї чи іншої схеми ГПА коефіцієнту продуктивності, розрахованому за імовірністю. Разом із тим, відношення імовірнісного показника надійності до показника за математичним очікуванням підтверджує адекватність моделі, оскільки найвищий показник надійності за

імовірністю відповідає найвищому показнику стану повної готовності системи.

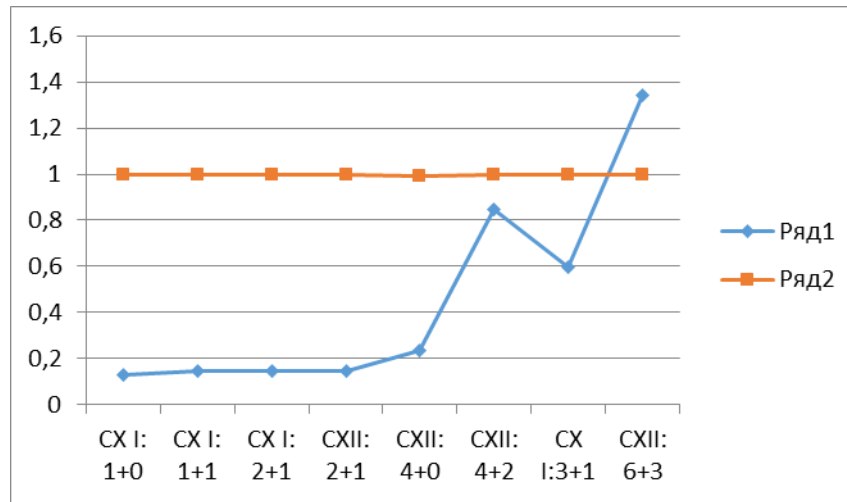


Рисунок 3 – Відношення коефіцієнта продуктивності за математичним очкуванням (початкові показники надійності) та коефіцієнту продуктивності за імовірністю

Висновок. В результаті проведеного дослідження реалізовано математичну модель розрахунку коефіцієнта повної готовності для вибору оптимальної схеми ГПА. Аналіз отриманих результатів дозволив виявити залежності між показниками надійності основних схем з'єднання газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях, які можна застосовувати для вибору оптимальної схеми з'єднання ГПА, перевірки роботи системи в цілому за наявності кількох типів відмов, прогнозування показників надійності системи. Це дає можливість перевірити правильність вибору оптимальної схеми ГПА за допомогою відповідності коефіцієнту продуктивності вираженого через початкові показники надійності.

Список використаних джерел

1. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Ткачешак Н. В. Математична модель системи «нагнітач природного газу-антипомпажний клапан». *Дослідження та методи аналізу*. 2017. № 2(63). С. 79-89.

2. Матвійчук В. А., Веселовська Н. Р., Шаргородський С. А. Математичне моделювання новітніх технологічних систем: Монографія. Вінниця, 2021. 192 с.

3. Пritула Н. Математичне моделювання перехідних процесів і системах транспортування газу. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/8600abe0-e779-422a-a08f-0b495d670eb8/content>.

4. Пritула Н. Розрахунок параметрів потокорозподілу газу в газотранспортній системі (стаціонарний випадок). *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2007. Вип. 5. С. 146-155.

5. Заміховський Л. М., Зікрать С. В., Штаєр Л. О. Сучасний стан оцінки надійності систем автоматики газоперекачувальних агрегатів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2017. № 2. С. 79-88.

6. Середюк М. Д., Ганджа М. Є. Вибір енергоефективних режимів експлуатації магістральних газопроводів за їх неповного завантаження. *Науковий вісник Івано-*

Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2017. № 1. С. 67-72.

7. Чепуркін В. До побудови системи моделювання й оптимізації процесів транспортування природного газу. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2007. Вип. 5. С. 156-169.

8. Олійник А. П., Фешанич Л. І. Математичне моделювання процесу деформування та напруженого стану трубопроводів під дією динамічних навантажень. *Вісник національного технічного університету «ХПИ»*. 2020. №1(3). С. 5-14.

9. Розрахунок надійності різних технологічних з'єднань ГПА. *Комплексна галузева методика: типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання*. Івано-Франківськ, 2009. С. 20-27.

References

1. Horbiychuk M. I., Kohutyak M. I., Tkacheshak N. V. Matematychna model' systemy «nahnitach pryrodnoho hazu-antypompazhnyy klapan». *Doslidzhennya ta metody analizu*. 2017. № 2(63). P. 79-89. [in Ukrainian].

2. Matviychuk V. A., Veselovs'ka N. R., Sharhorods'kyu S. A. Matematychno modelyuvannya novitnikh tekhnolohichnykh system: Monohrafiya. Vinnytsya, 2021. 192 p. [in Ukrainian].

3. Prytula N. Matematychno modelyuvannya perekhidnykh protsesiv i systemakh transportuvannya hazu. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/8600abe0-e779-422a-a08f-0b495d670eb8/content>. [in Ukrainian].

4. Prytula N. Rozrakhunok parametriv potokorozpodilu hazu v hazotransportniy systemi (statsionarnyy vypadok). *Fizyko-matematychno modelyuvannya ta informatsiyeni*

tekhnolohiyi. 2007. Vol. 5. p. 146-155. [in Ukrainian].

5. Zamikhovs'kyu L. M., Zykraty S. V., Shtayer L. O. Suchasnyy stan otsinky nadiynosti system avtomatyky hazoperekachuval'nykh ahrehati. *Naukovyy visnyk Ivano-Frankivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2017. № 2. P. 79-88. [in Ukrainian].

6. Seredyuk M. D., Handzha M. YE. Vybir enerhoefektyvnykh rezhyziv ekspluatatsiyi mahistral'nykh hazoprovodiv za yikh nepovnoho zavantazhennya. *Naukovyy visnyk Ivano-Frankivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2017. № 1. P. 67-72. [in Ukrainian].

7. Chepurkin V. Do pobudovy systemy modelyuvannya y optymizatsiyi protsesiv transportuvannya pryrodnoho hazu. *Fizyko-matematychno modelyuvannya ta informatsiyeni tekhnolohiyi*. 2007. Vol. 5. P. 156-169. [in Ukrainian].

8. Oliynyk A. P., Feshanych L. I. Matematychno modelyuvannya protsesu deformuvannya ta napruzenoho stanu truboprovodiv pid diyeyu dynamichnykh navantazhen'. *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. 2020. №1(3). P. 5-14. [in Ukrainian].

9. Rozrakhunok nadiynosti riznykh tekhnolohichnykh z'yednan' HPA. *Kompleksna haluzeva metodyka: typovi rozrakhunky pokaznykiv nadiynosti system hazonaftopostachannya*. Ivano-Frankivs'k, 2009. P. 20-27. [in Ukrainian].