

УДК 681.514:621.438

DOI 10.31471/1993-9981-2019-1(42)-47-55

АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ НАГНІТАЧІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

М. І. Горбійчук, О. Т. Біла, Б. В. Пашковський, Н. Т. Лазорів
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
ул. Карпатська, 15, м.Івано-Франківськ, 76019, e-mail: gorb@nung.edu.ua

У зв'язку зі зменшенням обсягів транспортування газу через газотранспортну систему України актуальною проблемою є раціональне завантаження компресорних станцій з врахуванням технічного стану газоперекачувальних агрегатів.

У статті на засадах нечіткої логіки отримана математична модель, яка дала змогу визначити технічний стан паралельно працюючих газоперекачувальних агрегатів з врахуванням таких параметрів як продуктивність нагнітача, витрата паливного газу, тиск і температура на вході і на виході відцентрового нагнітача, температура продуктів згоряння на виході із турбіни низького тиску, частота обертання вала нагнітача, температура та тиск навколишнього середовища, віброшвидкість та віброприскорення, швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі, концентрації оксидів азоту і вуглецю у вихлопних газах.

Витрата паливного газу, яка вимірюється засобами штатної автоматики, залежить від багатьох чинників таких як атмосферний тиск, температура навколишнього середовища, фізико-хімічні властивості паливного газу, технічний стан та тип газотурбінного двигуна. Все це дає підстави вважати витрату паливного газу нечіткою величиною. Експериментальні дослідження в умовах Богородчанської компресорної станції показали, що нечітка величина «витрата паливного газу» має гаусовську функція належності. Тому задача вибору оптимальної кількості паралельно працюючих агрегатів формалізована як задача цілочислового лінійного програмування, критерієм оптимальності в якій є вартість паливного газу, який споживає компресорна станція з врахуванням технічного стану газоперекачувальних агрегатів і нечіткості витрати паливного газу.

Ефективність розробленого методу підтверджена розрахунками, які ґрунтуються на промислових даних отриманих при експлуатації Богородчанської компресорної станції.

Ключові слова: компресорна станція, газоперекачувальний агрегат, технічний стан, критерій оптимальності, невизначеність, функція належності, нечіткі числа, оптимізація.

В связи с уменьшением объемов транспортировки газа через газотранспортную систему Украины актуальной проблемой является рациональная загрузка компрессорных станций с учетом технического состояния газоперекачивающих агрегатов.

В статье на принципах нечеткой логики получена математическая модель, которая дала возможность определить техническое состояние параллельно работающих газоперекачивающих агрегатов с учетом таких параметров как производительность нагнетателя, расход топливного газа, давление и температура на входе, и на выходе центробежного нагнетателя, температура продуктов сгорания на выходе из турбины низкого давления, частота вращения вала нагнетателя, температура и давление окружающей среды, виброускорение и виброускорение, скорость накопления продуктов срабатывания в моторном масле, концентрации оксидов азота и углерода в выхлопных газах.

Расход топливного газа, которая измеряется средствами штатной автоматики, зависит от многих факторов таких как атмосферное давление, температура окружающей среды, физико-химические свойства топливного газа, техническое состояние и тип газотурбинного двигателя. Все это дает основания считать расход топливного газа нечеткой величиной. Экспериментальные исследования в условиях Богородчанской компрессорной станции показали, что нечеткая величина "расход топливного газа" имеет гаусовскую функция принадлежности. Поэтому задача выбора оптимального количества параллельно работающих агрегатов формализована как задача целочисленного линейного программирования, критерием оптимальности в

якою є вартість паливного газу, що споживається компресорною станцією з урахуванням технічного стану газоперекачувальних агрегатів і нечіткості витрати паливного газу.

Ефективність розробленого методу підтверджена розрахунками, які базуються на промислових даних, отриманих при експлуатації Богородчанської компресорної станції.

Ключові слова: компресорна станція, газоперекачувальний агрегат, технічний стан, критерій оптимальності, неопределенність, функція належності, нечіткі числа, оптимізація.

In connection with reduction of volumes of transporting of gas through the gas-transport system of Ukraine the issue of the day is the rational loading of the compressor stations taking into account the technical state of gascompressor units. The mathematical model was developed in the article on principles of fuzzy logic, that gave an opportunity to define the technical state of gascompressor units that are working in parallel taking into account such parameters as the productivity of supercharger, expense of fuel gas, pressure and temperature on an entrance, pressure and temperature on the exit of centrifugal supercharger, temperature of products of combustion on an exit from the turbine of LP, frequency of rotation of shaft of the supercharger, temperature and pressure of environment, vibrospeed and vibroacceleration, speed of accumulation product of triggering in agile olive, concentration oxide nitrogen and carbon in exhaust-gas.

The expense of fuel gas, that is measured by facilities of regular automation, depends on many factors such as atmospheric pressure, ambient temperature, physical and chemical properties of fuel gas, technical state and type of turbo-engine. All that grounds to consider the expense of fuel gas an unclear value. Experimental researches on the base of Bohorodchany compressor station showed, that unclear value the "expense of fuel gas" has Gauss function of belonging. Therefore the task of choice of optimal amount of aggregates working in parallel is formalized as a task of integer of the linear programming, the criterion of optimality in that is a cost of fuel gas that consumes the compressor station taking into account the technical state of gascompressor units and unclearness of expense of fuel gas.

Efficiency of the worked out method is confirmed by calculations that are based on industrial data received during exploitation of Bohorodchany compressor station.

Key words: compressor station, gascompressor unit, technical state, criterion of optimality, vagueness, function of belonging, unclear numbers, optimization.

Вступ

На сучасному етапі газотранспортною системою України прокачують обумовлені обсяги природного газу, з використанням економічних критеріїв таких як: мінімум витрати паливного газу, максимум ККД та критерій мінімуму енерговитрат. Ці критерії лежать в основі методів оптимального керування процесом компримування природного газу і їм притаманні певні недоліки [1]: не взято до уваги кількість спожитого газу; задача оптимізації формулюється як задача безумовної оптимізації без врахування обмежень, які накладають на витрати через відцентровий нагнітач (ВЦН), на частоту обертання ротора ВЦН, на потужність газотурбінної установки (ГТУ); граничні значення задають тільки на параметри нагнітача і не задаються на параметри ГТУ; не врахована нечіткість задачі керування спричинена зміною технічного стану ГПА та зміною навколишнього середовища, не враховані похибки вимірювальних приладів.

Основною метою системи оптимального керування компресорним цехом є оптимальний

розподіл навантаження між газоперекачувальними агрегатами за умови підтримання загальної продуктивності компресорної станції. При цьому сумарні витрати паливного газу повинні мати мінімальне значення з врахуванням впливів зовнішнього середовища та обмежень на технологічні параметри.

Газодинамічні характеристики відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів змінюються з плином часу, залежать від умов експлуатації та їх технічного стану, що зумовлює нечітку природу задачі оптимального керування процесом компримування природного газу. Значний вплив на ідентифікацію технічного стану газоперекачувальних агрегатів мають, зокрема [1], оксиди азоту і вуглецю у вихлопних газах.

Метою роботи є: створення математичних моделей процесу компримування природного газу групою паралельних агрегатів, в яких враховані їх технічні стани, як нечіткі величини; удосконалення методу ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їхнім технічним станом шляхом включення у модель додаткових параметрів; розроблення методу

оптимального керування процесом компримування природного газу на засадах нечіткої логіки і генетичних алгоритмів.

Аналіз літературних джерел

В роботі [2] пропонується спосіб визначення діагностичних ознак технічного стану відцентрових нагнітачів природного газу з використанням результатів спостережень за їх роботою у складі ГПА. Використовуючи дані спостережень, обчислюють політропний коефіцієнт корисної дії $\eta_{пол}$ та внутрішню потужність N_j як функції від приведеної об'ємної Q_{np} та масової G продуктивності нагнітача – $\eta_{пол} = f(Q_{np})$ і $N_j = f(G)$. Вказані характеристики є показниками ефективності роботи нагнітача.

Для ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом у роботах [3, 4] застосовано апарат нечіткої логіки. Для характеристики технічного стану ГПА були вибрані такі параметри: коефіцієнт технічного стану відцентрового нагнітача за політропним ККД та за потужністю, параметри вібродіагностики агрегату та результати діагностування стану системи змащування, які інтегрально характеризують стан ГПА в цілому. Реалізація запропонованого методу ранжирування ГПА здійснювалась за допомогою сформованих функцій належності для п'ятих вхідних та однієї вихідної величин на основі опитування експертів. Це дало змогу побудувати нечітку продукційну модель, де здійснювалось квантування за рівнем вхідних і вихідних факторів з подальшим визначенням їхнього лінгвістичного значення на кожному із рівнів. Методом опитування експертів-операторів були отримані відповідності між функціями належності, правилами керування та лінгвістичними змінними, які характеризують технічний стан газоперекачувального агрегату.

У роботі [5] отримана діагностична модель ВЦН, що враховує енергетичні втрати на витікання газу і тертя дисків. Така модель дає змогу відслідковувати зміну діагностичних ознак у часі й за такими змінами робити висновки про технічний стан нагнітача.

З проведеного аналізу математичних моделей, які використовуються для діагностики

ВЦН, витікає, що вони не враховують вплив навколишнього середовища, зокрема, тиску та температури, на роботу нагнітача, або враховують частково [6]. Оскільки не існує математичної моделі, яка враховувала би параметри навколишнього середовища, то виникає задача побудови математичної моделі, адекватної процесу компримування природного газу.

В 70-х роках ХХ століття у зв'язку із паливним дефіцитом магістральні газопроводи експлуатувались у режимі максимальної продуктивності. Основним критерієм ефективності роботи вітчизняних магістральних трубопроводів того часу була максимізація пропускну режиму його роботи [7].

У сучасних умовах, коли об'єми поставок природного газу, як правило, обумовлені, використовують економічні критерії оцінки ефективності роботи газотранспортної системи. До них відносять: мінімум витрати паливного газу, максимум ККД та, вище згаданий, критерій мінімуму енерговитрат [8-10].

Автори роботи [7] вважають, що замість алгоритму оптимізації режиму за критерієм максимального завантаження і мінімуму енерговитрат [11-12] можна використовувати енергетичний метод розрахунку режиму роботи багатоцехової КС [8].

Метод визначення узагальненого коефіцієнта технічного стану на засадах нечіткої логіки

Проведені експериментальні дослідження з метою побудови діагностичної моделі технічного стану газоперекачувального агрегату дали можливість визначити вхідні та вихідні параметри моделі - продуктивність нагнітача Q , витрата паливного газу G , тиск і температура $P_{вх}$, $T_{вх}$ на вході й тиск і температура $P_{вих}$, $T_{вих}$ на виході відцентрового нагнітача, температура $T_{вих,г}$ продуктів згоряння на виході із турбіни низького тиску (ТНТ), частота обертання вала нагнітача n , температура T_a та тиск P_a навколишнього середовища, віброшвидкість та віброприскорення, швидкість накопичення продуктів спрацювання в оливі системи змащування, концентрації оксидів азоту і вуглецю у вихлопних газах.

Для визначення узагальненого показника технічного стану ГПА проведені експериментальні дослідження [1], які дають змогу за результатами вимірювання концентрацій оксидів азоту і вуглецю у вихлопних газах, обчислити масові концентрації оксидів азоту та вуглецю і знайти концентрації, що приведені до умовної п'ятнадцяти відсоткової концентрації кисню у сухих продуктах згоряння

$$C_{NO_x}^{15} = \alpha \frac{C_{NO_x}}{3,5}, \quad (1)$$

$$C_{CO}^{15} = \alpha \frac{C_{CO}}{3,5}, \quad (2)$$

де C_{NO_x} , C_{CO} - концентрації оксидів азоту і вуглецю у вихлопних газах, $мг/нм^3$; α - коефіцієнт розбавлення сухих продуктів згоряння, який визначається за показами газоаналізатора.

До перерахованих вище параметрів доданий індекс концентрації окисів азоту і вуглецю у вихлопних газах та визначити узагальнений показник індексів концентрацій азоту і вуглецю за такою формулою:

$$\begin{aligned} \mu^{d_j}(y) = & a_{j1} \cdot [\mu^{j1}(x_1) \wedge \mu^{j1}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{j1}(x_n)] \vee \\ & a_{j2} \cdot [\mu^{j2}(x_1) \wedge \mu^{j2}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{j2}(x_n)] \vee \dots \vee \\ & \vee a_{jp} \cdot [\mu^{jp}(x_1) \wedge \mu^{jp}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{jp}(x_n)], j = \overline{1, m} \end{aligned} \quad (4)$$

де x_1 - швидкість накопичення продуктів в оливі системи змащування; x_2 - коефіцієнт технічного стану за політропним коефіцієнтом корисної дії; x_3 - коефіцієнт технічного стану газотурбінного двигуна за потужністю; x_4 - віброшвидкість; x_5 - вібропереміщення; x_6 - узагальнений індекс концентрації оксидів азоту і вуглецю.

У результаті математичних перетворень була отримана формула [1], за якою був обчислений узагальнений коефіцієнт технічного стану ГПА при фіксованих значеннях факторів впливу x_j ,

$$j = \overline{1, m}; m = 6$$

$$K_p = \frac{C'_{NO_x}}{C^{ном}_{NO_x}} + \frac{C'_{CO}}{C^{ном}_{CO}} \quad (3)$$

де C'_{NO_x} , C'_{CO} - концентрації оксидів азоту і вуглецю у вихлопних газах, $мг/нм^3$, приведених до умовної концентрації кисню 15%; $C^{ном}_{NO_x}$ - номінальна приведена концентрація оксидів азоту, $мг/нм^3$; $C^{ном}_{CO}$ - номінальна приведена концентрація оксидів вуглецю, $мг/нм^3$.

Проведені експериментальні дослідження лягли в основу синтезованої, згідно з правилом Л. Заде [13], бази знань, що вміщує 4096 правил.

Кожний із п'яти параметрів, який характеризує технічний стан ГПА, був розбитий на п'ять термів. Методом опитування експертів побудовані усереднені функції належності з використанням методу статистичної обробки інформації та методу парних порівнянь [13] (рис. 1).

Сформована база знань дала змогу визначити функціональний зв'язок між функціями належності входів і виходів у вигляді таких нечітких логічних рівняннянь:

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m [\underline{y} + (j-1) \cdot \Delta] \cdot \mu^{d_j}(y)}{\sum_{j=1}^m \mu^{d_j}(y)}, \quad (5)$$

де $\mu^{d_j}(y)$ - функція належності виходу y , що приведена до інтервалу $d_j = [y_{j-1}; y_j]$, $j = \overline{1, m}$;

$\Delta = \frac{\bar{y} - \underline{y}}{m-1}$; \bar{y} , \underline{y} - максимальне та мінімальне значення вихідної величини y .

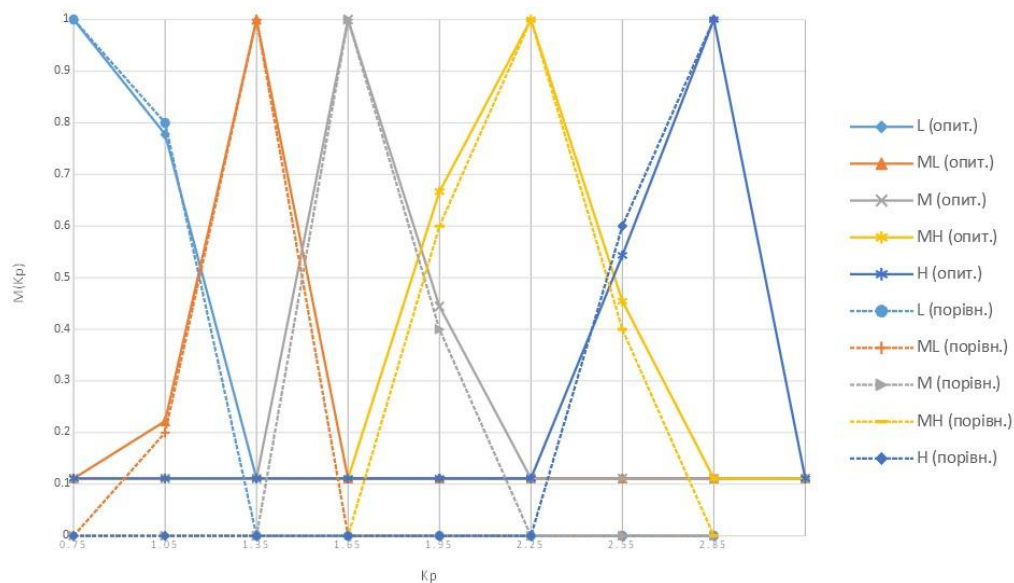


Рисунок 1 – Зведені функції належності індексу концентрації отримані методами опитування експертів та парних порівнянь

За правилами нечіткої логіки був знайдений розв'язок системи нечітких логічних рівнянь у вигляді вектора

$$\mu(c) = \{\mu(c_1), \mu(c_2), \dots, \mu(c_n)\}, \quad (6)$$

який задовольняє обмеження $\mu(c_i) \in [0; 1]$, $j = \overline{1, n}$, де $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ - множина вхідних факторів, від яких залежить технічний стан ГПА.

Співвідношення (5) і (6) покладені в основу побудови універсального нечіткого апроксиматора визначення технічного стану ГПА [15]. Його програмна реалізація дозволила зробити такі висновки [1]. Основними причинами погіршення технічного стану ГПА є підвищення віброшвидкості і вібропереміщення та низький коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним коефіцієнтом корисної дії та коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю. Інші показники такі як швидкість накопичення продуктів спрацювання в оливі системи змащування та індекси оксидів азоту і вуглецю порівняно менше впливають на узагальнений показник технічного стану ГПА.

Визначення кількості паралельно працюючих нагнітачів природного газу в умовах невизначеності

При зменшенні обсягів транспортування природного газу компресорна станція (КС) має надлишкову потужність. Тоді працюють не всі агрегати, а тільки їх частина. У такому випадку маємо задачу вибору певного числа паралельно працюючих агрегатів з врахуванням їх технічного стану і, які повинні забезпечити задану продуктивність компресорної станції.

Допустимо, що є s груп нагнітачів природного газу з приводами від газотурбінних двигунів (ГТД). У кожній із груп є N_j , $j = \overline{1, s}$ нагнітачів природного газу. ГТД у кожній групі споживають G_j , $j = \overline{1, s}$ одиниць паливного газу за одиницю часу. Паспортна продуктивність нагнітача q_j .

Будемо розв'язувати так задачу: у кожній із груп знайти таку кількість нагнітачів N_j , $j = \overline{1, s}$, щоб, при заданих обсягах транспортування газу, витрата паливного газу була б мінімальною.

Поставлену задачу запишемо у формалізованому вигляді. Загальна витрата паливного газу за одиницю часу, яку споживає компресорна станція

$$R(\bar{N}) = \sum_{j=1}^s G_j N_j. \quad (7)$$

Загальне число компресорів повинно бути таким, щоб забезпечити задану продуктивність компресорної станції Q_0 .

Допускаємо, що в межах однієї групи ГПА коефіцієнт завантаження кожного нагнітача k_j пропорційний його технічному стану. Коефіцієнт завантаження k_j j -го нагнітача будемо обчислювати за такою формулою:

$$k_j = \frac{k_j^T}{\sum_{i=1}^{N_j} k_i^{T(m)}}, \quad (8)$$

де k_j^T - коефіцієнт узагальненого технічного стану j -го нагнітача, $\sum_{i=1}^{N_j} k_i^{T(m)}$ - сума коефіцієнтів технічних станів нагнітачів у j -тій групі, кількістю N_j . Урахування коефіцієнта завантаження j -тої групи нагнітачів приводить до такого рівняння:

$$\sum_{j=1}^s k_j q_j N_j = Q_0. \quad (9)$$

Очевидно, що загальне число нагнітачів N_j в кожній j -тій групі не повинно бути більшим за їх максимальне значення b_j , тобто

$$N_j \leq b_j, \quad (10)$$

До обмежень (9), (10) приєднаємо очевидну вимогу невід'ємності значень величин

$$N_j \geq 0, \quad j = \overline{1, s} \quad (11)$$

Середня витрата паливного газу G_j на привід ГТД у j -тій групі залежать від цілого ряду факторів – атмосферного тиску і температури навколишнього середовища, фізико-хімічних властивостей паливного газу, технічного стану та типу ГТД. Тому будемо вважати значення G_j нечіткою величиною з гаусовою функцією належності [14]:

$$\mu(G_j) = \exp\left(-\frac{(G_j - \bar{G}_j)^2}{2\sigma_{G_j}^2}\right),$$

де \bar{G}_j - модальне значення нечіткої величини G_j ; σ_{G_j} - коефіцієнт концентрації, який визначає «розмитість» нечіткої величини G_j .

Тепер задачу визначення оптимальної кількості паралельно працюючих нагнітачів з газотурбінним приводом у кожній із s груп сформулюємо таким чином. Визначити такі обороти ротора кожного нагнітача природного газу, щоб загальне споживання паливного газу газотурбінним двигунами за одиницю часу були мінімальними при виконанні технологічних обмежень на компримування природного газу.

Оскільки значення G_j є нечітким числом, то критерій оптимальності (7) буде також нечіткою величиною. Знайдемо функцію належності нечіткої величини $R(\bar{N})$ за умови, що нечітка величина G_j має гаусову функцію належності. У відповідності з [15]

$$\mu(R) = \exp\left(-\frac{\left(R - \sum_{j=1}^s \bar{G}_j N_j\right)^2}{2 \sum_{j=1}^s \sigma_{G_j}^2 N_j^2}\right). \quad (12)$$

Візьмемо деяке фіксоване значення рівня належності $\mu(R) = \gamma$, якому відповідає $R = R^*$. Розв'язуючи рівняння (12) за умови, що $\mu(R) = \gamma$, отримуємо такий результат:

$$R^* = \sum_{j=1}^s \bar{G}_j N_j + \ln \frac{1}{\gamma^2} \sqrt{\sum_{j=1}^s \sigma_{G_j}^2 N_j^2}. \quad (13)$$

Тепер початкова задача (8) з обмеженнями (9) – (11) трансформувалась у таку задачу: знайти вектор $\bar{N} = (N_1, N_2, \dots, N_s)^T$, що мінімізує (13) на множині обмежень (9) – (11).

Задача (13) з обмеженнями (9) – (11) має ту особливість, що необхідно збалансувати сумарну продуктивність нагнітачів зі завданням на транспортування природного газу (умова (9)). Крім того цілочисельні змінні N_j , $j = \overline{1, s}$ обмежені зверху умовою (10). Оскільки на змінні $N_j \geq 0$, $j = \overline{1, s}$ накладається умова цілочисельності, то у загальному випадку

обмеження-рівність (9) може бути виконана лише наближено. Це означає, що значення N_j повинні бути такими, щоб виконувалась умова

$$\sum_{j=1}^s k_j q_j N_j - Q_0 = P_\Delta, \quad (14)$$

де $P_\Delta \geq 0$ - надлишкова продуктивність компресорної станції, яка виникає внаслідок цілочисельності значень N_j .

Із умова (14) витікає, що один або кілька нагнітачів будуть недовантажені.

У тому випадку, коли $\sum_{j=1}^s k_j q_j N_j - Q_0 < 0$, необхідно почергово кількість нагнітачів у групі збільшувати на одиницю з врахуванням обмеження (9), обчисливши при цьому значення критерію оптимальності (13). Новий набір кількості нагнітачів у кожній із s груп буде розв'язком сформованої задачі (13) з обмеженнями (9) – (11).

Для розв'язання дискретної задачі (13) з обмеженнями (9) – (11) був вибраний метод меж

і гілок, який реалізований у програмному середовищі MatLab. Апробація розробленого програмного забезпечення здійснена на прикладі [16], який складений з використанням даних отриманих при експлуатації Богородчанської компресорної станції. Дані необхідні для розв'язання задачі (13) з обмеженнями (9) – (11) наведені у табл. 1.

Результатом розв'язання задачі (13) з обмеженнями (9) – (11) є такий результат:

- кількість нагнітачів у першій групі – 3;
- кількість нагнітачів у другій групі – 4;
- кількість нагнітачів у третій групі – 1;
- загальні затрати паливного газу – 39463 м³/год;

- перевищення сумарної продуктивності нагнітачів над заданим обсягом перекачки Q_0 , складає $P_\Delta = 68,1 \text{ м}^3/\text{год}$. Це означає, що один із нагнітачів буде недовантажений на величину P_Δ .

Таблиця 1 - Вихідні дані для розв'язання задачі оптимізації

Характеристики	Групи нагнітачів		
	Перша група	Друга група	Третя група
Кількість нагнітачів у групі	3	7	4
Загальна продуктивність нагнітачів $q_j, \text{ м}^3/\text{год}$	1782000	2749300	2371680
Енергетичні затрати на привід $G_j, \text{ тис. м}^3/\text{год}$	5,292	3,312	5,868
Заданий обсяг перекачки газу $Q_0, \text{ м}^3/\text{год}$	3700800		
Коефіцієнт концентрації $\sigma_j, \text{ м}^3/\text{с}$	0,45	0,41	0,37

Відмітимо, що у тому випадку, коли знята умова цілочисельності на змінні $N_j \geq 0$,

$j = \overline{1, s}$, оптимальне значення витрати паливного газу за одиницю часу, яке є результатом розв'язування задачі (7) з обмеженнями (9) – (11), було б таким: $R^* = 36989 \text{ м}^3/\text{год}$. Отже, збільшення витрат (у

силу цілочисленності задачі) на компримування газу зросте на 6,32 %.

Висновки

З використанням методів нечіткої логіки синтезований нечіткий апроксиматор, що дало змогу визначити узагальнений коефіцієнт технічного стану кожного із паралельно працюючих нагнітачів.

Формалізована задача визначення кількості паралельно працюючих нагнітачів з врахуванням їх технічних станів. Сформована задача цілочислового програмування розв'язана методом у меж і гілок. Розроблене програмне забезпечення задачі апробоване на конкретному прикладі.

Література

1. Пашковський Б. В. Оптимальне керування процесом компримування природного газу в умовах невизначеності: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. Івано-Франківськ, 2018, 19 с.

2. Горбійчук М. І., Самуляк С. Т., Щупак І. В. Інтегральні діагностичні ознаки технічного стану відцентрових нагнітачів природного газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2009. № 22. С. 17 – 21.

3. Горбійчук М. І., Заячук Я. І. Діагностичні показники технічного стану газоперекачувальних агрегатів. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2010. № 6/3 (48). С. 43 – 45.

4. Сеницын С. Н., Сухарев М. Г., Леонтьев Е. В. Расчет режимов работы компрессорных станций магистральных газопроводов на ЭВМ. *Газовая промышленность*. 1966. №12. С. 17-19.

5. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Скріпка О. А. Діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу. *Нафтова і газова промисловість*. 2006. № 2. С. 36-38.

6. Загоринский Э. Е. Энергетический метод определения режима работ многоцеховой компрессорной станции. *Транспорт, хранение и использование газа в народном хозяйстве. Экспр. Информ. ВНИИЭГАЗПРОМ*. 1976. № 21. С. 3-4.

7. Загоринский Э. Б., Шустеф В. Н. Оптимизация режима работы магистрального газопровода о двум критериям. *Транспорт и хранение*. 1978. №7. С. 36-46.

8. Гарляускас А. И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа. М.: Недра, 1975. 155 с.

9. Джигит Г. А. Оптимизация режимов работы компрессорных станций. *Газовая промышленность*. 1974. № 5. С. 22.

10. Матевосян П. А., Бабаджанова М. А., Арутюнян Р. Л. Вчислительное устройство для оперативного оптимального распределения нагрузок между паралельно работающими нагнетателями компрессорной станции // *Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реферативный сборник*. - М.: ВНИИЭГАЗПРОМ. 1974. №.4. С. 9-12.

11. Гарляускас А. И. Оптимизация режимов газотранспортных систем по двум критериям. *Транспорт и хранение газа. Реф. сб. ВНИЭГАЗПРОМА*. 1973. № 3. С. 17-23.

12. Централизованный контроль и оптимальное управление на магистральных газопроводах. Л.: Недра, 1973. 328 с.

13. Раскин Л. Г., Серая О. В. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения. Харьков: Парус, 2008. 352 с.

14. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, нейронные сети, генетические алгоритмы. *Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця*, 1999. 320 с.

15. Пашковський Б. В., Горбійчук М. І. Визначення кількості термів для нечіткого опису індексів концентрації оксидів азоту і вуглецю у вихлопних, як параметрів узагальненого показника технічного стану газоперекачувального агрегату. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: матеріали V наук.-практ. конф. студентів і молодих учених (Івано-Франківськ, 24-25 лист. 2015)*. Івано-Франківськ, 2015. С. 156-157.

16. Gorbijchuk M., Pashkovskiy B., Moysenko O., Sabat N. Solution of the optimization problem on the control over operation of gas pumping units under fuzzy conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control systems*. 2017. Vol. 5, No 2(89) P. 65-71.

References

1. Pashkovskiy B. V. Optymal'ne keruvannya protsesom komprymuvannya pryrodnoho hazu v umovakh nevyznachenosti: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.07. Ivano-Frankivs'k, 2018, 19 s.

2. Gorbijchuk M. I., Samuliak S. T., Shchupak I. V. Intehralni diahnostychni oznaky tekhnichnoho stanu

vidtsentrovkykh nahnitachiv pryrodnoho hazu. Metody ta pryklady kontroliu yakosti. 2009. № 22. S. 17 – 21.

3. Gorbichuk M. I., Zaiachuk Ya. I. Diahnostychni pokaznyky tekhnichnoho stanu hazoperekachuvalnykh ahrehativ. Vostochno-evroneiskyy zhurnalпередовыkh tekhnolohiyi. 2010. № 6/3 (48). S. 43 – 45.

4. Synytsyn S. N., Sukharev M. H., Leontev E. V. Raschet rezhymov raboty kompressornykh stantsiy mahystralnykh hazoprovodov na ЭVM. Hazovaia promyshlennost. 1966. №12. S. 17-19.

5. Gorbichuk M.I., Kohutiak M. I., Skripka O. A. Diahnostychna model vidtsentrovoho nahnitacha pryrodnoho hazu. Naftova i hazova promyslovist. 2006. № 2. S. 36-38.

6. Zahorynskyi E. E. Enerhetycheskyi metod opredeleniya rezhyma robot mnohotsekhovoi kompressornoi stantsyy. Transport, khranenyie y yspolzovanyie haza v narodnom khazaistve. Эkspr. Ynform. VNYEHAZPROMA. 1976. № 21. S. 3-4.

7. Zahorynskyi E. B., Shustef V. N. Optymyzatsiya rezhyma raboty mahystralnoho hazoprovoda o dvum kryteriiam. Transport y khranenyie. 1978. №7. S. 36-46.

8. Harliauskas A. Y. Matematycheskoe modelyrovanyie operatyvnoho y perspektyvnoho planyrovanyia system transporta haza. M.: Nedra, 1975. 155 s.

9. Dzhyhyt H. A. Optymyzatsiya rezhymov raboty kompressornykh stantsiy. Hazovaia promyshlennost. 1974. № 5. S. 22.

10. Matevosian P. A., Babadzhanova M. A., Arutiunian R. L. Vychyslytelnoe ustroystvo dlia operatyvnoho optymalnoho raspredeleniya nahruzok mezhdum paralelno rabotaiushchymy nahnetateliamy kompressornoi stantsyy // Avtomatyzatsiya, telemekhanizatsiya y sviaz v hazovoi

promyshlennosti. Referatyvnyi sbornyk. - M.: VNYEHAZPROM. 1974. №.4. S. 9-12.

11. Harliauskas A. Y. Optymyzatsiya rezhymov hazotransportshkh system po dvum kryteriiam. Transport y khranenyie haza. Ref. sb. VNYEHAZPROMA. 1973. № 3. S. 17-23.

12. Tsentralyzovannyi kontrol y optymalnoe upravlenyie na mahystralnykh hazoprovodakh. L.: Nedra, 1973. 328 s.

13. Raskyn L. H., Seraia O. V. Nechetkaia matematyka. Osnovu teoryy. Prylozhenyia. Kharkov: Parus, 2008. 352 s.

14. Rotshtein A.P. Yntellektualnye tekhnolohyy ydentyfikatsyy: nechetkye mnozhestva, neuronnyie sety, henetycheskye alhorytmy. Vynnytsa: UNIVERSUM-Vinnytsia, 1999. 320 s.

15. Pashkovskiy B. V., Gorbichuk M. I. Vyznachennia kilkosti termiv dlia nechitkoho opysu indeksiv kontsentratsii oksydiv azotu i vuhletsiu u vykhlopnykh, yak parametriv uzahalnenoho pokaznyka tekhnichnoho stanu hazoperekachuvalnoho ahrehatu. Metody ta zasoby neruiniivnoho kontroliu promyslovoho obladnannia: materialy V nauk.-prakt. konf. studentiv i molodykh uchennykh (Ivano-Frankivsk, 24-25 lyst. 2015). Ivano-Frankivsk, 2015. S. 156-157.

16. Gorbichuk M., Pashkovskiy B., Moyseenko O., Sabat N. Solution of the optimization problem on the control over operation of gas pumping units under fuzzy conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control systems. 2017. Vol. 5, No 2(89) R. 65-71.