

## РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ СКЛАДНИХ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

<sup>1</sup>В. Я. Грудз, <sup>1</sup>Я. В. Грудз, <sup>2</sup>Р. В. Терещенко, <sup>1</sup>Б. І. Гершун

ІФНТУНГ; 76019, м Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail: sr gg 4 2 9 @ g m a i l . c o m

<sup>2</sup>Виробниче ремонтно-технічне підприємство «Укргазенергосервіс»;  
08150, м. Боярка, вул. Маяковського, 49; e-mail: terescenko-rv@utg.ua

Наведено принципи формування математичних моделей для вибору раціональних режимів експлуатації складних газотранспортних систем з багатоцеховими компресорними станціями, обладнаними різнотипними газоперекачувальними агрегатами. Оптимізацію режимів запропоновано здійснювати на основі використання енергоекономічних характеристик газотранспортної системи, які будуються шляхом параметрів газотранспортної системи з врахуванням технічного стану її елементів і економічних показників експлуатації за визначений період. Такий підхід забезпечує дотримання принципу експлуатації газотранспортної системи в області допустимих режимів і граничних енерговитрат, з одного боку, і мінімізації затрат на транспортування газу, з іншого. При можливості використання фактичних даних про реальний технічний стан обладнання і газопроводів системи вказаний метод дозволяє оцінити і врахувати в подальшій процедурі параметри надійності газопостачання. Важливою вимогою до процедури оптимізації є стійкість енергоекономічних характеристик, під якою розуміють те, що при будь-яких практичних змінах неосновних режимних параметрів енергоекономічна характеристика не повинна зміщуватися за межі допустимої похибки. Задача оптимального розподілу навантажень у складній газотранспортній системі розглядається, виходячи їх мінімуму сумарних енергетичних витрат при заданому обсязі подачі газу та інших планово-технологічних обмеженнях. Завдання оптимізації багатопараметричного об'єкта полягає в пошуку екстремуму функції мети шляхом вибору такого вектора керуючих впливів, який задовольнив би покладеним обмеженням. Розподіл навантажень на вищій ієрархії для системи магістральних газопроводів отримано відшукуванням мінімуму сумарних витрат на компримування газу по кожному газопроводу. Розглянуто методіку побудови таких характеристик і процедури встановлення їх стійкості, що дозволяє формалізацію побудови критеріальної залежності параметрів режиму від енергоекономічних факторів. Викладені принципи рішення дозволяють формалізувати функцію мети для вибору раціонального режиму експлуатації газотранспортної системи в умовах її неповного завантаження.

Ключові слова: газотранспортна система, енергоекономічна характеристика, оптимізація, функція мети, раціональний режим.

Приведены принципы формирования математических моделей для выбора рациональных режимов эксплуатации сложных газотранспортных систем с многоцеховыми компрессорными станциями, оборудованными разнотипными газоперекачивающими агрегатами. Предлагается оптимизация режимов на основе использования энергоэкономичных характеристик газотранспортной системы, которые строятся на основе параметров газотранспортной системы с учетом технического состояния ее элементов и экономических показателей эксплуатации за определенный период. Такой подход обеспечивает соблюдение принципа эксплуатации газотранспортной системы в области допустимых режимов и предельных энергозатрат, с одной стороны, и минимизации затрат на транспортировку газа, с другой. При возможности использования фактических данных о реальном техническом состоянии оборудования и газопроводов системы указанный метод позволяет оценить и учесть в дальнейшей процедуре параметры надежности газоснабжения. Важным требованием к процедуре оптимизации является устойчивость энергоэкономичных характеристик, под которой подразумевают то, что при любых практических изменениях неосновных режимных параметров энергоэкономическая характеристика не должна смещаться за пределы допустимой погрешности. Задача оптимального распределения нагрузок в сложной газотранспортной системе рассматривается, исходя их минимума суммарных энергетических затрат при заданном объеме подачи газа и других планово-технологических ограничениях. Задача оптимизации многопараметрического объекта заключается в поиске экстремума функции цели путем выбора такого вектора управляющих воздействий, который удовлетворил бы положенным ограничениям. Распределение нагрузок на высшей иерархии для системы магистральных газопроводов получено отысканием минимума суммарных затрат на компримирования газа по каждому газопроводу. Показана методика построения таких характеристик и процедуры

установлення їх устійчості, дозволяє формалізацію побудови критеріальної залежності параметрів режиму від енергоекономічних факторів. Изложенные принципиальные решения позволяют формализовать функцию цели для выбора оптимального режима эксплуатации газотранспортной системы в условиях ее неполной загрузки.

Ключевые слова: газотранспортная система, энергоэкономическая характеристика, оптимизация, функция цели, рациональный режим.

*The principles of formation of mathematical models for the choice of rational modes of operation of complex gas transmission systems with multi-shop compressor stations equipped with different types of gas pumping units are given. It is proposed to optimize the modes on the basis of the use of energy-economic characteristics of the gas transmission system, which are built on the basis of the parameters of the gas transmission system taking into account the technical condition of its elements and economic performance for a certain period. This approach ensures compliance with the principle of operation of the gas transmission system in the field of permissible modes and maximum energy consumption on the one hand and minimizing the cost of gas transportation on the other. If it is possible to use the actual data on the actual technical condition of the equipment and gas pipelines of the system, this method allows to evaluate and take into account in the further procedure the parameters of gas supply reliability. An important requirement for the optimization procedure is the stability of energy efficiency characteristics, which means that in any practical changes of non-basic regime parameters, the energy efficiency characteristic should not be shifted beyond the allowable error. The problem of optimal load distribution in a complex gas transmission system is considered based on their minimum total energy costs at a given volume of gas supply and other planning and technological constraints. The task of optimizing a multiparameter object is to find the extremum of the goal function by selecting a vector of control effects that would satisfy the constraint. The distribution of loads at the highest hierarchy for the system of main gas pipelines is obtained by finding the minimum total cost of gas compression for each pipeline. The method of construction of such characteristics and the procedure of establishing their stability are shown, which allows the formalization of the construction of the criterion dependence of the regime parameters on energy economic factors. The stated basic decisions allow to formalize the function of the purpose for a choice of a rational mode of operation of gas transmission system in the conditions of its incomplete loading.*

Key words: gas transmission system, energy economic characteristics, optimization, goal function, rational mode.

## Вступ

Експлуатація транзитної газотранспортної системи в умовах неповного завантаження передбачає часті зміни обсягів транспортування газу, тому виникає необхідність в оперативному прогнозуванні раціональних режимів роботи.

Складність систем транспортування газу та її багатогранна структура викликає труднощі з оптимізацією режимів роботи діючих об'єктів в умовах їх неповного завантаження. Введення попередньо розрахованих оптимальних еквівалентних характеристик для різних ступенів ієрархічної системи спрощує вирішення ряду конкретних завдань.

Якщо задана структура магістральних газопроводів, точки подачі газу в газопроводи, вузли газоспоживання, діапазони зміни потоків, відборів, тисків на головних спорудах і в кінцевих пунктах споживання, то задача оптимального керування зводиться до знаходження таких множин керуючих впливів (число працюючих компресорних станцій, агрегатів, швидкості обертання їх роторів) і відповідні їм режимні параметри (тиски, витрати, температура), які забезпечували б мінімум сумарних енергетичних витрат при заданих обсягах поставках газу і технологічних обмеженнях [3,4,8].

Завдання оперативного керування режимами тісно пов'язане з низкою інших завдань: поточного планування обсягів транспорту газу і основних економічних показників, які не можуть бути вирішені без визначення оптимальних витрат на експлуатацію системи [5]. Завдання компенсації нерівномірності газоспоживання, максимуму завантаження основного обладнання, надійності та ін. також тісно пов'язані з основним завданням оптимізації режимів газопостачальних систем.

**Мета роботи.** Для вирішення завдання оперативного оптимального керування складною багатоконтурною системою газопостачання пропонується метод ув'язки порівнюючих оптимальних рішень на базі еквівалентних характеристик.

Нехай існує газопостачальна система, що складається з різномірних підсистем: одноцехових і багатощехових компресорних станцій з різним компресорним обладнанням, одно- і багатониткових газопроводів з різними режимами роботи і різноманітними конфігураціями мереж. Для кожного такого об'єкта і на різних рівнях технологічної оснащеності пропонується на основі розроблених і порівняно простих математичних моделей побудувати сімейство різ-

норівневих оптимізованих за обраним загальним критерієм еквівалентних енергоекономічних характеристик, які можна подати у вигляді такої функції [3]:

$$F_i(\bar{R}) = \{f_{i_1}(\bar{R}_1), f_{i_2}(\bar{R}_2), \dots, f_{i_j}(\bar{R}_j), \dots, f_{i_n}(\bar{R}_n)\}, \quad (1)$$

де  $f_{i_j}(\bar{R}_n)$  – енергоекономічні характеристики  $j$ -го об'єкта  $i$ -го ієрархічного рівня, що залежністю мінімальних витрат від вектора режимних параметрів.

### Дослідження

Кожна характеристика визначається в обмеженому просторі режимів, межі якого завжди відомі з практики. Перевага пропонованого підходу полягає в тому, що багатовимірну задачу замінюють версією задачі малої розмірності.

Вирішують спрощену задачу: знайти

$$F_{i+1}(\bar{R}) = \min \sum_{l=1}^m f_{il}(\bar{R}_l) \quad (\text{var } \bar{R}_l \in D(\bar{R}_l)) \quad \text{і на-}$$

ступний за нею вектор режимів  $\bar{R}_l$ , де  $D(\bar{R}_l)$  допустима область режимів,  $m$  – число об'єктів, об'єднаних для отримання рішень підсистеми  $i+1$ -го рівня [8].

Оптимізацію продовжують доти, поки не досягнуть верхнього рівня. За необхідності реалізації рішень відтворюють всю сукупність локальних рішень за ланцюгом зворотного зв'язку до нижчої ланки, для якої відтворюються всі компоненти векторів керуючих впливів.

Для існуючої газопостачальної системи досить обмежитися розглядом двох рівнів [6,9]. На нижчому ієрархічному рівні визначають характеристики окремих магістральних газопроводів, підземних сховищ тощо. Кількість таких характеристик визначається числом ланок, проте в тих випадках, коли розглядаються ідентичні об'єкти, можуть бути використані одні й ті ж характеристики. За режимний вектор приймають основний параметр – витрату, інші складові вектора, як правило, фіксуються. Однак повністю ігнорувати вплив тиску і температури на вибір рішення на верхньому рівні ієрархії керування в жодному випадку не можна.

Перед визначенням еквівалентних характеристик необхідно, по-перше, виділити підсистеми, число зв'язків яких не повинно перевищувати трьох, по-друге, визначити головні і другорядні параметри. Після цього на основі розроблених моделей переходять до розрахунку еквівалентних енергоекономічних характеристик, що відображають залежність екстремальних (мінімальних) значень функціоналу від

основних параметрів стану і керування [5]. У загальному випадку енергоекономічні характеристики транспорту газу можуть бути записані таким чином

$$F_i(\bar{Q}_i, \bar{R}_i, \bar{u}_i) \Big|_{R_i} = \min f(\bar{Q}_i^1, \bar{R}_i, \bar{u}_i) \\ \text{var } \bar{u} \in D(\bar{u}_i), \\ \bar{Q}_i^1 \in D(\bar{Q}_i)$$

де  $\bar{Q}_i = \{Q_{io}, q_i, \dots, q_{in}\}, i=1,2,\dots \in m+1$  мірний вектор (план  $i$ -ї підсистеми з безлічі можливих планів  $D(\bar{Q}_i)$ ), що визначає величину відбору газу споживачами по трасі газопроводу;

$$\bar{Q}_i^1 - \text{довільний план з } D(\bar{Q}_i);$$

$\bar{R}_i = \{R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{il}\}$  – вектор допустимих режимів роботи  $i$ -го газопроводу;

$\bar{u}_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}\}$  – вектор допустимих керуючих впливів  $i$ -го газопроводу з безлічі можливих керувань  $D(\bar{u}_i)$ .

При цьому функціонал відображає мінімум сумарних енергетичних витрат на компримування газу по всій підсистемі (магістральному газопроводу) загалом. За основні параметри підсистеми обирають продуктивність газопроводу, оскільки вона значно більше впливає на величину витрат у порівнянні із змінами тисків на вході головної КС і на кінці газопроводу, тобто вектор

$$Q_i = Q_{io}, q_{in} = \text{const}.$$

Вочевидь, вид енергоекономічних характеристик визначається вибором моделі, ступенем деталізації математичного опису елементів підсистем компресорних станцій і лінійної частини газопроводу, а також складністю схеми самих підсистем (протяжність, число компресорних станцій). Процедура оптимізації режимів роботи магістральних газопроводів, заснована на методі динамічного програмування [1] з послідовними наближеннями, дозволяє розраховувати оптимальні режими компресорних станцій, оскільки експлуатаційні витрати складаються, в основному, з витрат на компримування газу. При цьому оптимальним чином вибирають число машин, які включаються паралельно і послідовно, швидкості обертання їх роторів, ступінь завантаження, коефіцієнт корисної дії, ступінь підвищення тиску і ряд інших технологічних параметрів. Аналіз рішень показує, що для складних газотранспортних систем за елементарну підсистему доцільніше брати магістральний газопровід – ланцюжок [7, 8].

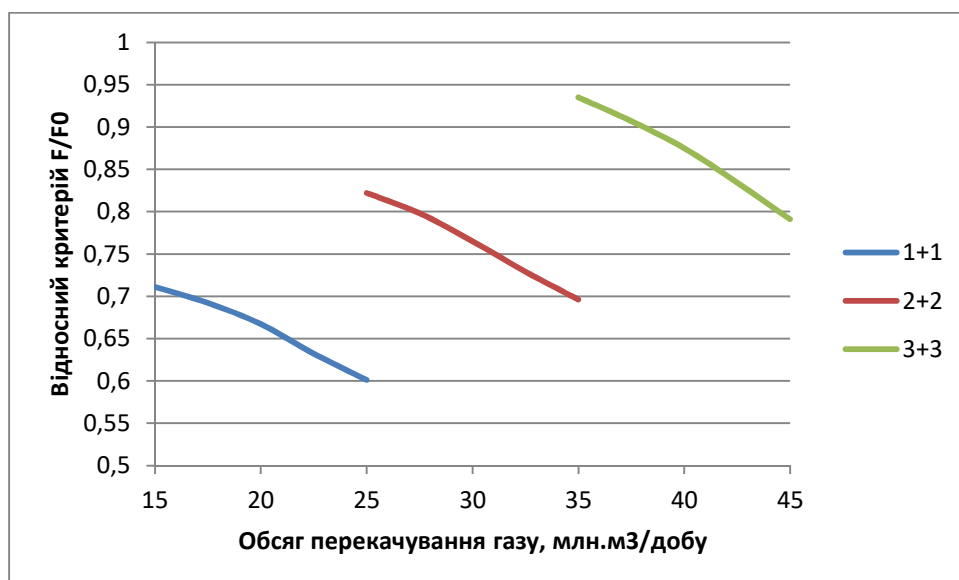


Рисунок 1 – Енергоекономічна характеристика газопроводу

**Результати**

На базі замкнутих оптимальних рішень розрахована енергоекономічна характеристика газопроводу «Шебелинка-Дніпропетровськ-Одеса», яка представлена на рисунку 1. По осі ординат відкладено відношення значення мінімуму критерію  $F$  до його номіналу  $F_0$ , по осі абсцис – навантаження – витрата газу магістрального газопроводу. Отримана залежність нелінійною ступінчастою функцією з розривами першого ряду. Стрибкоподібна зміна кривої викликана дискретними керуючими впливами (увімкненням агрегатів на КС).

Для використання багатовимірних енергоекономічних характеристик окремих газопроводів у задачі найвигіднішого розподілу навантажень в системі магістральних газопроводів необхідно подати такі характеристики в аналітичному вигляді. Нами використано програму апроксимації функції багатьох змінних поліномом [2]

$$\Phi = \sum_{i=0}^A \sum_{j=0}^B \sum_{k=0}^C a_{ij...k} x_1^{\pm i} x_2^{\pm j} \dots x_p^{\pm k} . \quad (1)$$

Багатовимірна енергоекономічна характеристика газопроводу з достатньою точністю наближається поліномом

$$\Phi = a_0 + a_1q + a_2Q + a_3q^2 + a_4Q^2 + a_5qQ .$$

Для газопроводу «Шебелинка-Дніпро-Одеса» енергоекономічна характеристика має вигляд

$$\Phi = 4853.617 + 209.929q - 185.1548Q - 3.05905q^2 + 1,98456Q^2 + 1.733864qQ .$$

Середня похибка апроксимації становить 0,037.

Ієрархічний принцип побудови оптимізованих рішень складних газотранспортних систем припускає обґрунтоване поділ таких систем на окремі підсистеми. Вибір граничних точок пов'язаний зі стійкістю енергоекономічних характеристик, а в точках поділу можливі зміни неосновних режимних параметрів, які зміщують її положення. У зв'язку з цим виникає необхідність оцінити діапазон можливих змін вихідного тиску по кожній такій підсистемі. До ймовірних граничних точок тиску газотранспортної системи на окремі підсистеми можна віднести компресорні станції в точках, які з'єднують системи магістральних газопроводів.

Як приклад розглянуто статистику зміни середовищ середньодобових тисків на входах КС. Для кожного місяця визначеного періоду обчислювали величину математичного очікування  $M(p)$  вхідного тиску. На рисунку 2 показана зміна цієї величини за рік. Тут же дано зміну математичного сподівання  $M^*(p)$ . Середньоквадратичне відхилення  $\sigma^2(p)$  вхідного тиску при переході від сезону до сезону змінюється не суттєво.

На рисунку 3 представлені характеристики вхідного тиску компресорної станції «Радущне». Аналіз результатів показує, що найбільш ймовірні відхилення вихідного тиску від середньодобового значення на КС «Краснопілля» не перевищують 11% , на КС «Радущне» – 16%. Ця величина для зимового сезону складає 9 – 10 % .

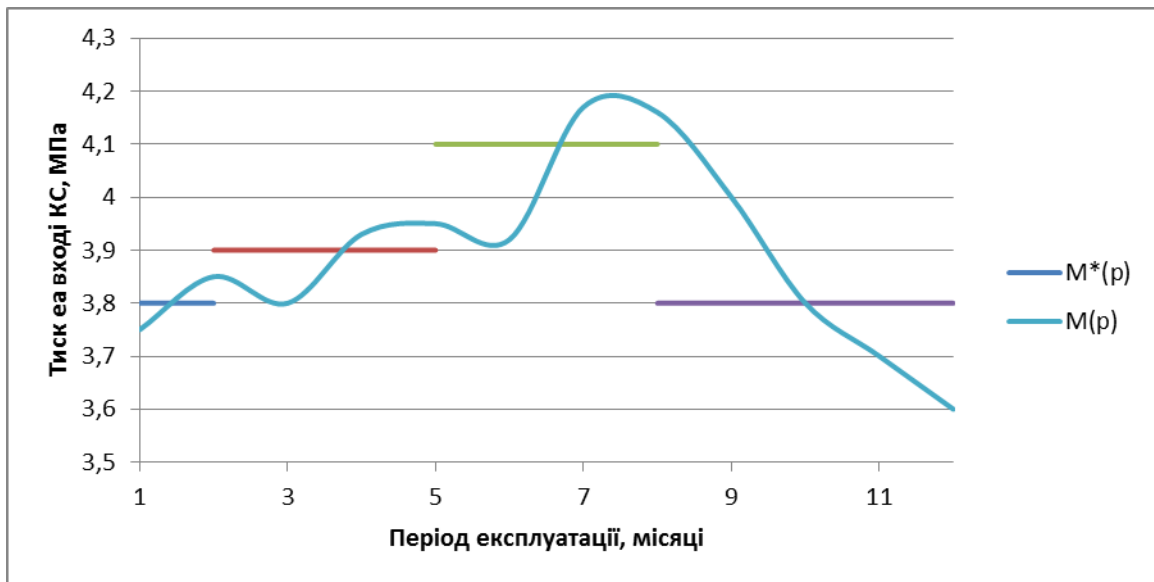


Рисунок 2 – Зміна математичного очікування вхідних тисків в часі на КС «Радущне»

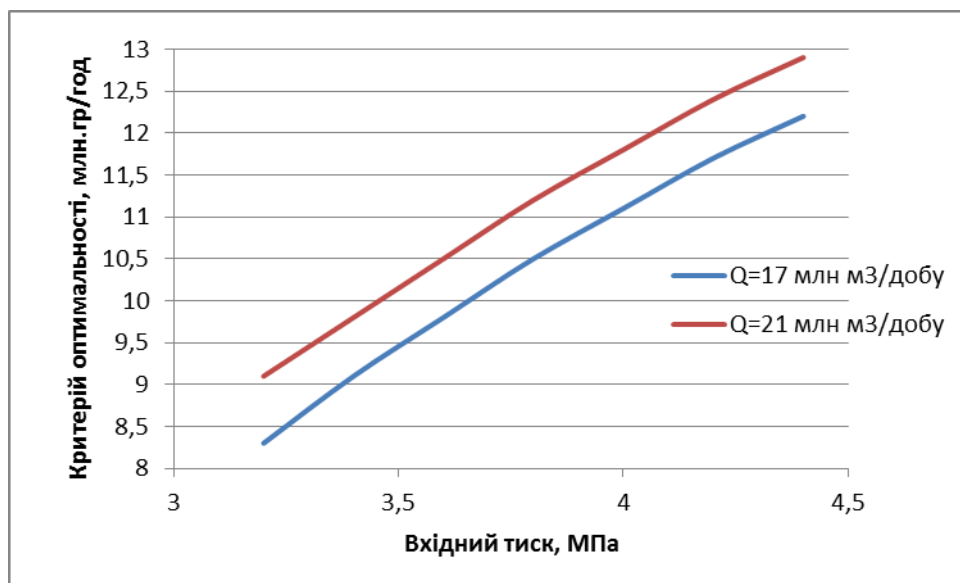


Рисунок 3 – Залежність мінімальних витрат від кінцевого тиску при фіксованій продуктивності

Природно припустити, що при звуженні тимчасового інтервалу від сезону до окремого місяця, для якого складають математичну модель газопроводу, ці цифри будуть ще меншими. Так, на КС-1 середньоквадратичне відхилення  $\sigma^2(p)$  вихідного тиску для трьох літніх місяців становить: 6 - 4,05 ; 7 - 3,8 , 8 - 4,6 у порівнянні  $\sigma^2(p) = 5,1$  загалом за літнім сезоном. Для більшої достовірності цих цифр необхідний статистичний аналіз зміни вихідного тиску на КС в місячному та сезонному розрізі за ряд років.

Всі ці відомості необхідні для того, щоб при вирішенні питань стійкості енергоекономічних характеристик за відповідними підсисте-

мами оцінити правильність вибору зазначених точок як граничних.

Під стійкістю розуміють те, що при будь-яких практичних змінах неосновних режимних параметрів енергоекономічна характеристика не повинна зміщуватися за межі допустимої похибки.

Дослідження стійкості енергоекономічних характеристик проведені на прикладі аналізу оптимальних режимів роботи магістрального газопроводу «Шебелинка-Дніпропетровськ-Одеса».

Як бачимо, мінімум витрат в основній робочій області мало залежить від вхідного і вихідного тисків. У цій області середньоквадрати-

чне відхилення мінімуму витрат  $\sigma^2(p) = 1,09\%$ . Тільки при тисках  $P_k = 5,4 \text{ МПа}$  і  $P_n = 4,8 \text{ МПа}$ ,  $\sigma^2(p) = 13,3\%$ , тобто ці параметри відносяться до області нестійкості енергоекономічних характеристик для даної системи магістральних газопроводів.

Мінімум витрат істотно залежить від головного параметра  $Q$ , в той час як зміна витрат від тиску на кінці  $P_k$  характеризується середньоквадратичним відхиленням в 1%.

На базі отриманих вище оцінок зміна граничних значень по КС «Ратушне» були проведені розрахунки на стійкість енергоекономічної характеристики цього газопроводу. Зміна величини кінцевого тиску на 13% щодо обраного  $P_k = 3,7 \text{ МПа}$  призводить до варіації функціоналу сумарних витрат величиною в 2%. Характер зміни  $z = f(P_k)$  представлений на рисунку 3. Розрахунок величини при фіксованій продуктивності газопроводу  $Q_0 = 49$  млн.  $\text{м}^3/\text{добу}$ , початковому тиску  $55,7 \text{ МПа}$ . У даному випадку можна вважати, що зміни величини функціоналу при варіації граничного значення  $P_k \pm 0,03 \text{ МПа}$  лежать в межах допустимої похибки обчислення сумарних витрат на компримування газу по газопроводу в цілому. Аналогічна картина спостерігається, як показують розрахунки, і на інших газопроводах.

Розглянемо задачу оптимального розподілу навантажень в складній газотранспортній системі, виходячи їх мінімуму сумарних енергетичних витрат при заданому обсязі подачі газу та інших планово-технологічних обмеженнях, як завдання математичного програмування. Знайдемо мінімальне значення функції

$$\Phi(\bar{Q}, \bar{R}, \bar{U}) \quad (2)$$

і відповідний йому розподіл навантажень  $Q$  і та керуючим впливом  $\bar{U}$  при обмеженнях

$$F_i(\bar{Q}_i, \bar{R}_i, \bar{U}_i) = \min f(\bar{Q}_i, \bar{R}_i, \bar{U}_i)$$

$$\bar{Q}_i \in D(\bar{Q}_i)$$

$$\bar{U}_i \in D(\bar{U}_i), \bar{R}_i \in D(\bar{R}_i), \sum_i Q_i = Q_0, i = 1, 2, \dots$$

Таким чином, завдання оптимізації багатопараметричного об'єкта полягає в пошуку екстремуму функції мети шляхом вибору такого вектора керуючих впливів, який задовольнив би покладеним обмеженням.

Розподіл навантажень на вищій ієрархії для системи магістральних газопроводів отримано відшуканням мінімуму сумарних витрат на компримування газу по кожному газопроводу. Кожна із енергоекономічних характеристик

складових цієї системи апроксимована у вигляді наступних поліномів (витрати вимірюються в тис.  $\text{м}^3/\text{год}$ ):

$$F_1 = 50.29 Q - 21.29 q_2 - 2984.55$$

( $q_2$  – відбір)

$$F_2 = 0.084 Q_2^2 + 304;$$

$$F_3 = 0.2 Q_3^2 + 94.8.$$

При цьому повинні виконуватися наступні балансові співвідношення

$$Q_1 + Q_3 - Q_2 = 0;$$

$$Q - Q_1 - q_2 = 0.$$

Обмеження за величиною потоків газу (млн.  $\text{м}^3/\text{добу}$ ) мають вигляд:

$$76 \leq Q \leq 84; 6 \leq q_2 \leq 18; 82 \leq Q_2 \leq 112;$$

$$24 \leq Q_3 \leq 34; 58 \leq Q_1 \leq 78.$$

Згідно з рішенням завдання нелінійного програмування за програмою координатної оптимізації з випадковим пошуком отримано значення складових вектора режимів у вигляді  $R\{Q, q_2, Q_2, Q_3, Q_1\} = \{76; 3; 16.8; 84.7; 25.1; 59.6\}$ .

Знайдений вектор відповідає мінімуму функціоналу і є рішенням поставленої оптимізаційної задачі вибору раціональних режимів експлуатації складної газотранспортної системи.

### Висновки

З метою оперативного оптимального керування складною багатоконтурною системою газопостачання пропонується метод ув'язки порівнюючих оптимальних рішень на базі еквівалентних характеристик, в якості яких запропоновано і використано на етапі неповного завантаження системи енергоекономічні характеристики; показано принцип їх побудови і використання для оптимального керування газотранспортною системою.

Вирішено задачу оптимального розподілу навантажень у складній газотранспортній системі, виходячи із мінімуму сумарних енергетичних витрат при заданому обсязі подачі газу та інших планово-технологічних обмеженнях. Таким чином, завдання оптимізації багатопараметричного об'єкта полягає в пошуку екстремуму функції мети шляхом вибору такого вектора керуючих впливів, який задовольнив би покладеним обмеженням.

## Література

## References

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 399 с.
2. Грудз В. Я., Грудз Я. В., Рудко В. В. Оцінка технічного стану елементів газоперекачувального агрегату компресорної станції магістрального газопроводу. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. №1(38). С. 88-90.
3. Грудз В. Я., Грудз Я. В., Дацюк А. В. Ефективність використання енергоресурсів при трубопровідному транспорті газу. *Нафтогазова енергетика*. 2008. № 1 (6). С. 52–54.
4. Грудз Я. В. Енергоефективність газотранспортних систем. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. 207 с.
5. Жидкова М. О., Руднік А. А. Формування системи розрахункових моделей для оцінювання ефективності функціонування лінійних ділянок магістральних газопроводів. *Екологія і ресурсобереження*. 2001. № 6. С. 66–69.
6. Ковалко М.П., Грудз В.Я., Михалків В.Б. Тимків Д.Ф., Шлапак Л.С., Ковалко О.М. Трубопровідний транспорт газу. Київ.: АренаЕКО, 2002. 600 с.
7. Мазур И. И., Иванцов О. М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. 1104 с.
8. Бобровский С. А., Щербаков С. Г., Яковлев Е. И. Гарляускас А. И., Грачев В. В. Трубопроводный транспорт газа. М.: Наука, 1976. 491 с.
9. Molenda J. Gaz ziemny. Katowice: Slask, 1974. 470 p.
1. Buslenko N. P. Modelirovanie slozhnyih sistem. M.: Nauka, 1978. 399 p. [in Russian]
2. Hrudz V. Ya., Hrudz Ya. V., Rudko V. V. Otsinka tekhnichnoho stanu elementiv hazoperekachovalnoho ahrehatu kompresornoj stantsii mahistralnoho hazoprovodu. *Rozvidka i rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2011. No 1(38). P. 88-90. [in Ukrainian]
3. Hrudz V. Ya., Hrudz Ya. V., Datsiuk A. V. Efektyvnist vykorystannia enerhoresursiv pry truboprovidnomu transporti hazu. *Naftohazova enerhetyka*. 2008. No 1 (6). P. 52–54. [in Ukrainian]
4. Hrudz Ya. V. Enerhoefektyvnist hazotransportnykh system. Ivano-Frankivsk: Lileia-NV, 2012. 207 p. [in Ukrainian]
5. Zhydkova M. O., Rudnik A. A. Formuvannia systemy rozrakhunkovykh modelei dlia otsiniuvannia efektyvnosti funktsionuvannia liniinykh dilianok mahistralnykh hazoprovodiv. *Ekolohyia y resursosberezhenye*. 2001. No 6. P. 66–69. [in Ukrainian]
6. Kovalko M. P., Hrudz V. Ya., Mykhalkiv V. B. Tymkiv D. F., Shlapak L. S., Kovalko O. M. Truboprovidnyi transport hazu. Kyiv.: ArenaEKO, 2002. 600 p.
7. Mazur I. I., Ivantsov O. M. Bezopasnost truboprovodnyih sistem. M.: ITs «ELIMA», 2004. 1104 p. [in Russian]
8. Bobrovskiy S. A., Scherbakov S. G., Yakovlev E. I. Garlyauskas A. I., Grachev V. V. Truboprovodnyiy transport gaza. M.: Nauka, 1976. 491 p. [in Russian]
9. Molenda J. Gaz ziemny. Katowice: Slask, 1974. 470 p. [in Polish]