

Наука — виробництву

УДК 622.691

DOI: 10.31471/1993-9973-2019-2(71)-71-76

ПРОГНОЗУВАННЯ СТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ МЕТОДОМ ІНТЕГРАЛЬНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ

¹Є.І. Крижанівський, ¹В.Я. Грудз, ¹В.Я. Грудз (мол.), ²Р.В. Терещенко

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: s r g g 4 2 9 @ g m a i l . c o m

² Виробниче ремонтно-технічне підприємство «Укргаз енергосервіс»;
08150, м. Боярка, вул. Маяковського, 49, e-mail: t e r e s c e n k o - r v @ u t g . u a

Наведено методи побудови системи інтегральних коефіцієнтів впливу для газотранспортних систем з метою оцінки параметрів її роботи на стаціонарних режимах експлуатації. Кожна зміна технологічних параметрів режиму роботи на вході газотранспортної системи обов'язково викличе реакцію системи, яка проявиться у зміні відповідних параметрів на її виході. Очевидно, що параметри входу і виходу системи пов'язані між собою складною системою рівнянь, реалізація якої вимагає певних часових витрат і збору додаткової інформації про технічний і гідрогазодинамічний стани системи на кожен момент часу. В умовах неповного завантаження газотранспортної системи, що передбачає часту зміну режимів її експлуатації, реалізація поставленої задачі не завжди можлива. Пропонується створити систему інтегральних коефіцієнтів впливу, які характеризують співвідношення вхідної і вихідної інформації у різних стаціонарних режимах, і формально подати її в матричному вигляді. Процеси, що характеризуються інтегральними коефіцієнтами впливу, в неявному вигляді містять технологічні параметри газопроводу (довжину, діаметр, коефіцієнт гідравлічного опору, теплопередачу в довкілля та ін.), які не завжди можна з достатньою точністю визначити детермінованими методами. Запропонована методика передбачає створення простих і ефективних способів прогнозування, що дозволяють судити про стан газопроводу за витратами і тисками на входах і виходах системи, тобто за експлуатаційними даними, які контролюються. На основі запропонованої методики пропонується створити оперативну систему, яка дозволить здійснювати керування режимами роботи магістрального газопроводу у випадках частой зміни обсягів перекачування. При зміні технологічної схеми газотранспортної системи виникає необхідність в адаптації інтегральних коефіцієнтів впливу. Застосування запропонованих методів показано на прикладі магістрального газопроводу «Союз».

Ключові слова: інтегральних коефіцієнтів впливу, параметри системи газопостачання, стаціонарний режим.

Приведены методы построения системы интегральных коэффициентов влияния для газотранспортных систем с целью оценки параметров ее работы в стационарных режимах эксплуатации. Каждое изменение технологических параметров режима работы на входе газотранспортной системы обязательно вызовет реакцию системы, которая проявится в изменении соответствующих параметров на ее выходе. Очевидно, что параметры входа и выхода системы связаны между собой сложной системой уравнений, реализация которой требует определенных временных затрат и сбора дополнительной информации о техническом и гидродинамическом состоянии системы на каждый момент времени. В условиях неполной загрузки газотранспортной системы, предусматривающей частую смену режимов ее эксплуатации, реализация поставленной задачи не всегда возможна. Предлагается создать систему интегральных коэффициентов влияния, которые характеризуют соотношение входной и выходной информации в различных стационарных режимах, и формально подать ее в матричном виде. Процессы, характеризующиеся интегральными коэффициентами влияния, в неявном виде содержат технологические параметры газопровода

(длина, диаметр, коэффициент гидравлического сопротивления, теплопередачу в окружающую среду и др.), которые не всегда можно с достаточной точностью определить детерминированными методами. Предложенная методика предусматривает создание простых и эффективных способов прогнозирования, позволяющие судить о состоянии газопровода по расходам и давлениям на входах и выходах системы, то есть по эксплуатационным данным, которые контролируются. На основе предложенной методики предлагается создать оперативную систему, которая позволит осуществлять управление режимами работы магистрального газопровода в случаях частой смены объемов перекачки. При изменении технологической схемы газотранспортной системы возникает необходимость в адаптации интегральных коэффициентов влияния. Применение предложенных методов показано на примере магистрального газопровода «Союз».

Ключевые слова: интегральных коэффициентов влияния, параметры системы газоснабжения, стационарный режим.

The authors present the methods of generating the system of the integral coefficients of influence for gas transmission systems aiming at the estimation of the parameters of its work on stationary operating modes. Each change of the technological parameters of the operation mode at the input of the gas transmission system will necessarily cause the reaction of the system which will manifest itself in changing the corresponding parameters at its output. Obviously, the parameters of the input and output of the system are interconnected by a complex system of equations, the implementation of which requires certain time costs and gathering additional information about the technical and hydrogasdynamic states of the system at each moment. Under the conditions of incomplete loading of the gas transmission system, which involves frequent changes in its operation modes, the accomplishment of the task is not always possible. It is suggested to create a system of integral coefficients of influence which characterize the ratio of input and output information in different stationary modes, and formally submit it in a matrix form. The processes characterized by integral coefficients of influence implicitly contain the technological parameters of the gas pipeline (length, diameter, hydraulic resistance coefficient, heat transfer to the environment, etc.) which can not always be determined with sufficient accuracy by the deterministic methods. The suggested methodology involves the creation of simple and effective methods of predicting which allow estimating the state of the gas pipeline by the costs and pressures at the inputs and outputs of the system, that is, by the operational data that are being monitored. On the basis of the proposed methodology, it is suggested to create an operational system that will allow managing the modes of operation of the main gas pipeline in cases of frequent changes in pumping volumes. When changing the technological scheme of the gas transmission system, there is a need to adapt the integral coefficients of influence. The application of the proposed methods is illustrated by the example of the main gas pipeline Soyuz.

Key words: integral coefficients of influence, parameters of the gas supply system, stationary mode.

Вступ. Експлуатація транзитної газотранспортної системи в умовах неповного завантаження передбачає часті зміни обсягів транспортування газу, що викликає необхідність в оперативному прогнозуванні стаціонарних режимів роботи системи. Для прогнозування поведінки системи транспорту газу в умовах зміни режимів експлуатації важливо оцінити стан трубопроводів і компресорних станцій з метою вибору оптимального режиму експлуатації. Така задача вимагає проведення детального обстеження елементів газотранспортної системи, що передбачає значні витрати часу. Тому актуальним питанням є створення спрощених методик оцінки гідравлічного стану газотранспортної системи і оперативного прогнозування стаціонарних режимів її експлуатації.

Огляд літератури. Основи методу інтегральних коефіцієнтів впливу стосовно нафтових і газових родовищ були розроблені в працях Белаша П.М. [1] і отримали подальший розвиток для дослідження систем газопостачання в [2]. На їх основі можливе створення простих і ефективних способів, що дозволяють

судити про стан газопроводу тільки за витратами і тисками на входах і виходах системи, тобто за тими даними, які підлягають контролю в процесі експлуатації. Застосування методів інтегральних коефіцієнтів впливу економлять машинний час розрахунку і виявляються досить ефективними для складних газотранспортних систем без компресорних станцій, або на ділянках мережі між компресорними станціями. Процеси, що спостерігаються на входах і виходах системи транспорту газу, інтегрально враховують параметри трубопроводу, як ось: його довжину, діаметр, гідравлічний опір тощо. Використовуючи поняття про коефіцієнти впливу, вдається отримати співвідношення, що значно спрощують аналіз роботи системи транспорту газу.

Завдання дослідження. Нехай на усіх входах і виходах газопровідної системи підтримуються нульові умови, тобто $p_1^2, p_2^2, \dots, p_n^2 = 0$. В цьому випадку зміна витрат у вузлах трубопроводу також відсутня. Для того, щоб зв'язок $q_1^2 = p_2^2 = \dots = p_n^2 = 0$ був лінійним, викорис-

товуємо квадрати тиску і пропускної спроможності. Припустимо, що в деякій точці трубопроводу станеться одиничний стрибок квадрата тиску від $p_0^2 = 0$ до p_{01}^2 Па². В усій внутрішній області спостерігатиметься деяке підвищення тиску, а на усіх входах і виходах системи витрата, яка визначається характеристикою системи, через деякий час зросте. Отримані при цьому функції Q_{ij}^2 називаються коефіцієнтами впливу за витратою. При одиничній стрибкоподібній зміні квадрата тиску на усіх входах і виходах отримаємо n^2 коефіцієнтів впливу за витратою. Вони утворюють матрицю

$$Q^2 = \begin{bmatrix} Q_{11}^2 \cdot \dots \cdot Q_{1n}^2 \\ Q_{21}^2 \cdot \dots \cdot Q_{2n}^2 \\ \dots \dots \dots \\ Q_{n1}^2 \cdot \dots \cdot Q_{nn}^2 \end{bmatrix},$$

де Q_{12}^2 — реакція на першому виході (вході) при одиничному стрибку на другому вході (виході)

На діючому газопроводі завжди підтримуються певні тиски на усіх входах і виходах, тому коефіцієнти впливу необхідно визначати за нульових граничних умов [3]. При тиску на входах і виходах газопроводу $p_1^2, p_2^2, p_3^2, \dots, p_n^2$ відповідно встановляться деякі квадрати витрат $q_1^2, q_2^2, q_3^2, \dots, q_n^2$.

При зміні тиску на першому вході або виході $\Delta p_1^2 = p_1^2 - p_{11}^2$ через певний час спостерігатимуться нові квадрати витрат $q_{11}^2, q_{21}^2, q_{31}^2, \dots, q_{n1}^2$.

При зміні квадрату тиску на величину Δp_1^2 коефіцієнт впливу на першому вході або виході за пропускною спроможністю описується рівнянням

$$Q_{1j}^2 = \frac{q_{j1}^2 - q_j^2}{p_1^2 - p_{11}^2} = \frac{\Delta q_j^2}{\Delta p_1^2}.$$

Аналогічно визначаються коефіцієнти впливу за витратою для усіх інших входів і виходів системи. Коефіцієнти впливу є приростами квадратів витрат на кожному вході або виході, віднесені до значення стрибка квадрата тиску в точці збурення.

Дослідження. Якщо зміни витрати реєструвати в часі, можна визначити функцію впливу між кожним вхідним і вихідним параметром системи. Користуючись коефіцієнтами впливу, оцінюють статику системи транспорту газу.

Функція впливу дає можливість аналізувати нестационарні процеси в цій системі. Якщо задаватися не тиском, а пропускною спроможністю газотранспортної системи, то відношення змін квадратів тисків на входах і виходах системи до довільного стрибка квадратів витрати на вході дає систему коефіцієнтів впливу за тиском:

$$p_{1j}^2 = \frac{p_{j1}^2 - p_j^2}{q_1^2 - q_{11}^2} = \frac{\Delta p_j^2}{\Delta q_1^2}.$$

Для усієї газотранспортної системи отримуємо матрицю коефіцієнтів впливу за тиском

$$p^2 = \begin{bmatrix} p_{11}^2 p_{12}^2 \dots p_{1n}^2 \\ p_{21}^2 \dots \dots p_{2n}^2 \\ \dots \dots \dots \\ p_{n1}^2 \dots \dots p_{nn}^2 \end{bmatrix}.$$

Матриці коефіцієнтів за тиском і пропускною спроможністю між собою взаємопов'язані і характеризують систему транспорту газу як технологічний об'єкт, що підпорядковується керівним впливам. Коефіцієнти впливу за тиском і пропускною спроможністю можуть бути використані при розв'язанні низки завдань, пов'язаних з експлуатацією газопроводу, що працює в стаціонарному режимі; для аналізу нестационарних режимів роботи газопроводів будеться функція впливу. Для стаціонарних режимів роботи газопроводів, що описуються в загальному випадку рівняннями Лапласа, формула Гріна записується у вигляді

$$\sum_{i=1}^n (q_i^2 \Delta p_i^2 - p_i^2 \Delta q_i^2) = 0,$$

де

$$\Delta p_i^2 = p_{i1}^2 - p_i^2;$$

$$\Delta q_i^2 = q_{i1}^2 - q_i^2.$$

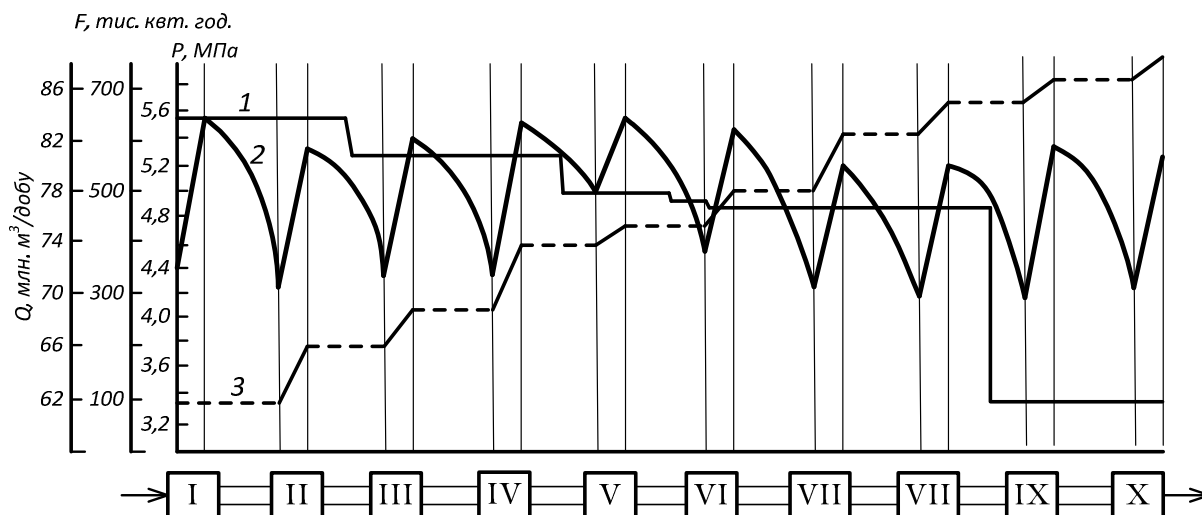
Звідси виводимо формулу для визначення квадрата витрати на будь-якому j -тому вході або виході при збуреннях на n входах або виходах

$$q_j^2 = \sum_{i=1}^n P_i^2 Q_{ji}^2 \quad (1)$$

і формулу для визначення квадрата тиску

$$p_j^2 = \sum_{i=1}^n q_i^2 P_{ji}^2. \quad (2)$$

Коефіцієнти впливу можуть бути визначені за експлуатаційними даними [4,5]. Для знаходження матриці коефіцієнтів доводиться вдаватися до визначення зміни тиску і продуктивності в декількох діапазонах часу $T_1, T_2, T_3 \dots, T_n$.



1 – витрата газу; 2 – тиск; 3 – енергетичні витрати: I – КС-10; II – КС-11; III – КС-12; IV – КС-13; V – КС-14; VI – КС-15; VII – КС-16; VIII – КС-17; IX – КС-18; X – КС-19; I-IV – ГТ-6-750; V – ГТ-750-6 (4x1); VI, VII – ГТ-750-6 (4x2); VIII-X – АФ3-4500 (5x2)

Рисунок 1 – Оптимальні режими магістрального газопроводу

Для цих інтервалів визначаємо квадрати витрат на входах і виходах системи $[q_i^2]$ і квадрати тисків $[p_i^2]$. Підставивши у формули (1) і (2) виміряні дані, отримуємо систему рівнянь

$$[q_i]^2 = \sum_{j=1}^n [p_j]^2 Q_{ji}^2,$$

звідки знаходимо коефіцієнти впливу за витратою. З виразу

$$[p_j]^2 = \sum_{i=1}^2 [q_i]^2 p_{ji}^2,$$

знаходимо величину p_{ji} .

Для розгляду нестационарних режимів системи газопостачання необхідно використати функції впливу. В цьому випадку треба отримати матриці коефіцієнтів у вигляді

$$Q_{ij}^2(t) = \frac{\Delta q_j^2(t)}{\Delta p_j^2} \quad \text{і} \quad p_{ij}^2(t) = \frac{\Delta p_j^2(t)}{\Delta q_i^2},$$

де

$$q_j^2(t) = q_j^2(t) - q_{j0}^2(t);$$

$$p_j^2(t) = p_j^2(t) - p_{j0}^2(t).$$

Тут Δp_i^2 , Δq_i^2 – стрибкоподібні дії на вході або виході ГТС (індекс «0» означає первинний стаціонарний режим).

В цьому випадку маємо:

$$[q_j(t)]^2 = \sum_{i=1}^n [p_i]^2 Q_{ji}^2(t) = \sum_{i=1}^n f_i S_{ji}(t);$$

$$[p_j(t)]^2 = \sum_{i=1}^n [q_i]^2 p_{ji}^2(t) = \sum_{i=1}^n m_i h_{ij}(t),$$

де

$$f_i = [p_i]^2, \quad S_{ji} = Q_{ji}, \quad m_i = [q_i]^2; \quad p_{ij} = h_{ij}.$$

Якщо крайові умови мають довільний вигляд, то, апроксимуючи їх серією імпульсних дій і далі використовуючи інтеграл Дюамеля

$$x(t) = \int_0^t x'(t) h(t - \tau) d\tau,$$

де $h(t-x)$ - функція впливу,

$x'(t)$ - імпульсна дія на входах і виходах системи, перейдемо до формул для аналізу систем газопостачання в нестационарному режимі:

$$q_j^2(t) = \sum_{i=1}^n \int_0^t [f_i(\tau)] S_{ji}(t - \tau) d\tau;$$

$$p_j^2(t) = \sum_{i=1}^n \int_0^t [m_i(\tau)] h_{ij}(t - \tau) d\tau,$$

або, якщо це зручніше,

$$q_j^2(t) = \sum_{i=1}^n \int_0^t f_i(t - \tau) S''(\tau) d\tau;$$

$$p_j^2(t) = \sum_{i=1}^n \int_0^t m_i(t - \tau) h'(\tau) d\tau.$$

Проте для визначення функцій впливу можна використати лише статистичні методи, що обмежує можливості методики.

За цією методикою були розраховані стаціонарні режими для магістрального газопроводу СОЮЗ завдовжки 803 км. на ділянці Бар-Ужгород (рисунок 1).

Досвід експлуатації свідчить, що перші п'ять ділянок газопроводу працюють в режимі,

близькому до стаціонарного. Остання ділянка – Хуст - Ужгород – характеризується нестационарним режимом газопередачі, який усереднювався по площі. Під час визначення коефіцієнтів впливу за витратою використовувалися значення витрати і тиску, узяті за відповідні моменти часу з експлуатаційних журналів. Шляхом розрахунку отримано для ділянки Гусятин – Богородчани значення коефіцієнтів Q_{ij}^2 :

$$Q_{11}^2 = -22,65; Q_{12}^2 = 19,95; Q_{13}^2 = 8,07;$$

$$Q_{21}^2 = -19,95; Q_{22}^2 = -35,46; Q_{23}^2 = 13,56;$$

$$Q_{31}^2 = 8,07; Q_{32}^2 = 13,56; Q_{33}^2 = -39,81.$$

Коефіцієнт Q_{21}^2 показує, наскільки збільшиться витрата під час відбору (індекс 2) при збільшенні тиску на вході газопроводу (індекс 1) і т. д.

Під час апробації методики були отримані наступні витрати. При обчисленні витрат відносна похибка розрахунків коливалася від 1,5 до 14%.

Коефіцієнти за тиском для ділянки Гусятин – Богородчани:

$$p_{11}^2 = -0,270; p_{12}^2 = -1,181; p_{13}^2 = -0,123;$$

$$p_{21}^2 = -0,181; p_{22}^2 = -0,163; p_{23}^2 = -0,090;$$

$$p_{31}^2 = -0,123; p_{32}^2 = -0,090; p_{33}^2 = -0,089$$

Для м. Гусятин на виході КС

$$p_p = 52,4 \text{ кгс/см}^2; p_d = 53,9 \text{ кгс/см}^2, \Delta = 2,8\%;$$

для м. Богородчани

$$p_p = 42,2 \text{ кгс/см}^2; p_d = 44,2 \text{ кгс/см}^2, \Delta = 4,5\%;$$

для м. Хуст на вході КС

$$p_p = 27,9 \text{ кгс/см}^2; p_d = 29,0 \text{ кгс/см}^2, \Delta = 3,8\%,$$

де p_p - розрахунковий тиск;

p_d - тиск за даними диспетчерських служб.

Відносна похибка коливається від 1 до 8%.

За цією методикою для стаціонарного випадку створена проста аналогова модель, яка моделює фізичні величини за електричними.

Для k -того вузла схеми залежність між напругою U і струмами I записується у вигляді:

$$\sum_{k=1}^{k=n} g_{ik} u_k = I_k,$$

де g_{ik} - провідність елементів схеми, що порівняно з розглянутим вище рівнянням (1).

Шляхом установки провідності $g_{ik} = c_Q Q_{ij}^2$ струмів $I_i = c_q q_i^2$, напруги $u_i = c_p p_i^2$, (де c_Q, c_q, c_p — коефіцієнти перерахунку), отримуємо:

$$q_{ij} \frac{c_q}{c_p c_Q} = \sum_{i=1}^{i=n} p_i^2 Q_{ji}^2,$$

тобто умовами тотожності початкових рівнянь і рівнянь аналогової моделі є критерій

$$\frac{c_q}{c_p c_Q} = 1.$$

Коефіцієнти Q_{ij}^2 визначаються розглянутими методами за даними експлуатації для конкретного газопроводу.

Висновок

Методика дозволяє створити аналогову систему-радник для складних газопроводів. Основний недолік такого підходу полягає в тому, що коефіцієнти впливу необхідно визначати при кожній зміні системи газопостачання. Якщо ж коефіцієнти впливу визначені і не коригуються, то при підключенні нових споживачів газу, газопроводів або газових родовищ помилка зростає.

Література

1. Белаш П.М. О коэффициентах влияния и взаимовлияния при решении задач регулирования отбора нефти из нефтяных и газовых месторождений. *Энергетика и электроника в нефтяной промышленности* : зб. стат. (МИНХиГП им. И.М. Губкина). 1964. Вып. 47. С.14 – 27.
2. Ковалко М.П., Грудз В.Я., Михалків В.Б. та ін. Трубопровідний транспорт газу. К. : АренаЕКО, 2002. 600 с.
3. Filipchuk O., Grudz V., Marushchenko V., Myndiuk V., Savchuk M. Development of cleaning methods complex of industrial gas pipelines based on the analysis of their hydraulic efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2/8 (92) 2018. - ISSN 1729-3774.
4. Щербаков С. Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа. М. : Наука, 1982. 205 с.
5. Гарляускас А.И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа. М. : Недра, 1975. 160 с.

References

1. Belash P.M. On the coefficients of influence and influence in solving problems of regulating the selection of oil from oil fields in gas fields. *Energy and electronics in the oil industry* : digest of stricles (MINliGP them. THEM. Gubkin). 1964. Vol. 47. pp. 14-27.

2. М Ковалко.Р., Grudz V.Ya., Mikhalkov V.B. etc. Pipeline gas transport. К. : ArenaEKO, 2002. 600 p.

3. Filipchuk O., Grudz V., Marushchenko V., Myndiuk V., Savchuk M. Development of cleaning methods complex of industrial gas pipelines based on the analysis of their hydraulic efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2/8 (92) 2018. - ISSN 1729-3774.

4. Shcherbakov S.G. Problems of pipeline transportation of oil and gas. М. : Nauka, 1982. 206 p.

5. Garliauskas A.I. Mathematical modeling of operational and future planning of gas transport systems. М. : Nedra, 1975. 160 p.