

Наука і сучасні технології

УДК 681.5.017: 681.5.042

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАНОК ПІДСИСТЕМИ АНТИПОМПАЖНОГО РЕГУЛЮВАННЯ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ

С.Г.Гіренко

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067
e-mail: kafatp@ukr.net

Рассматриваются математические модели таких звеньев как конфузор, центробежный нагнетатель, задвижки, утечки, разветвления газопровода, обеспечивающие описание объекта и подсистемы антипомпажного регулирования системы автоматического управления центробежным газоперекачивающим агрегатом дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа "Бильче-Волиця".

The mathematical models of such links are examined as konfuzor, centrifugal supercharger, bolts, losses, forks of gas pipeline, which allow to provide description of object and subsystem antipompag adjusting of the automatic control the centrifugal over aggregate of the compressor station of dug-out of gas of "Bilche-Volitsa".

Математичне моделювання ланок підсистеми антипомпажного регулювання (АПР) системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом (САК ГПА) з відцентровим нагнітачем докачуючої компресорної станції (ДКС) "Більче-Волиця" підземного сховища газу (ПСГ) є актуальною науково-практичною задачею у зв'язку з необхідністю аналізу динамічних властивостей і перевірки працездатності розробленої підсистеми АПР і САК ГПА. Ця підсистема функціонує у взаємодії з центральною частиною САК ГПА, системою керування подачею палива, швидкодіючим антипомпажним клапаном (АПК) "Моквелд", який встановлений на вихідному колекторі послідовно з краном (№6) об'язки нагнітача та призначена для антипомпажного регулювання та захисту цього нагнітача у випадку наближення до помпажних явищ шляхом забезпечення рециркуляції компримованого газу.

Проте, аналіз літературних джерел [1÷3, 6÷9 та ін.] свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень в контексті математичного моделювання ланок підсистеми АПР і САК ГПА.

ДКС ПСГ являє собою сукупність компресорної станції, ГПА, запірної і регулюючої арматури, лінійних і кільцевих ділянок газопроводу, конфузоров, байпасів, вузлів зміни діаметрів та ін. Зміна режиму одного з елементів ДКС впливає на режим роботи системи зага-

лом. Для оцінки впливу і аналізу такого впливу необхідно отримати математичні моделі цих елементів.

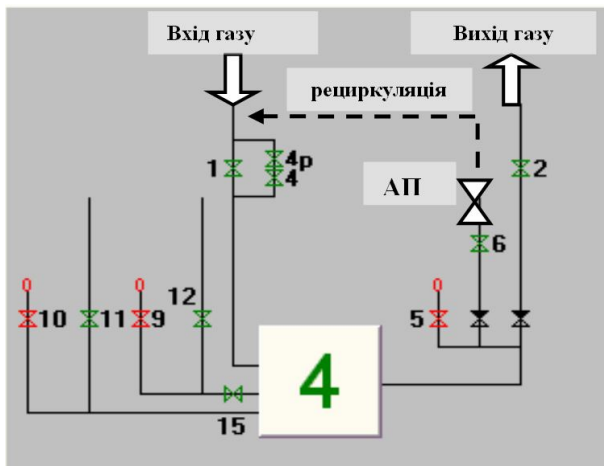
Метою даної роботи є математичне моделювання окремих ланок підсистеми АПР САК ГПА ДКС підземного сховища газу. Для вирішення поставленої задачі використано методи теорії лінійних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами і перетворення Лапласа.

Розглянемо схему технологічної об'язки ГПА типу Ц-16 з газотурбінним приводом, зображену на рис.1.

ГПА Ц-16 складається з газотурбінного двигуна НК-16-СТ виробництва АМЗ м. Казань і відцентрового повнонапірного нагнітача НЦ-16 виробництва НВО ім. Фрунзе.

Під час складання системи рівнянь динаміки окремих ланок прийнято таку послідовність операцій:

- виявлення фізичного закону, який визначає поведінку ланки в САК ГПА;
- визначення змінних параметрів, що входять до рівняння;
- визначення вхідних і вихідних параметрів ланки;
- складання рівняння динаміки ланки
- лінеаризація рівняння динаміки за допомогою ряду Тейлора та отримання лінійного диференціального рівняння з постійними коефіцієнтами;



крани №№: 1, 2 – підключення до “магістралі” Ду700мм; 6, АПК – забезпечення рециркуляції нагнітача на “мале кільце” Ду300мм; 12, 15 – подача паливного газу в камеру двигуна; 11 – подача пускового газу на пневмостартер двигуна; 5, 10, 9 – свічні технологічні

Рисунок 1 – Схема технологічної обв’язки ГПА типу Ц-16 з газотурбінним приводом

- складання рівнянь у відхиленнях шляхом віднімання із рівняння динаміки рівняння статики;
- перехід до безрозмірних відхилень;
- запис рівнянь у потрібній стандартній формі.

Конфузор встановлено на трубопроводі для контролю масової витрати газу (рис. 2). В цій частині має місце зменшення діаметра трубопроводу.

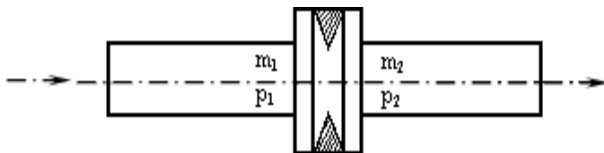


Рисунок 2 – Умовне зображення конфузора

Для опису цієї неоднорідності запропоновано використати формулу Дарсі – Вейсбаха [1]:

$$p_1 - p_2 = \frac{\lambda \rho l_e \vartheta_c^2}{2D}, \quad (1)$$

де: $l_e = \frac{D}{\lambda} \lambda_m$ [7];

λ_m – коефіцієнт місцевого опору;

λ – коефіцієнт гідравлічного опору, як функція критерію Рейнольдса Re й шорсткості трубопроводу [8, 9];

ϑ_c – середня швидкість газу;

$(p_1 - p_2)$ – перепад тисків газу на конфузори;

D – діаметр перерізу газопроводу;

ρ – густина природного газу.

З метою спрощення рівнянь конфузори наближено можна описати рівнянням, яке засто-

совується для місцевого опору і яке відображає втрати тиску внаслідок зменшення діаметра газопроводу.

У цьому випадку можна використати такі співвідношення (рис. 1):

$$\begin{aligned} m_2 &= m_1, \\ p_2 &= p_1 - \Delta p, \end{aligned} \quad (2)$$

де Δp – перепад тиску на ділянці, що розглядається.

Далі перепад тиску Δp на неоднорідній ділянці газопроводу довжиною l можна записати, як функцію від m_1 , скориставшись виразом для масової витрати

$$m_1 = F \vartheta_c \rho, \quad (3)$$

де F – площа проходного перерізу конфузори.

Для цього домножимо чисельник і знаменник рівняння (1) на вираз (3). Тоді отримаємо формулу для перепаду тиску на конфузори у такому вигляді:

$$\Delta p = \frac{\lambda \vartheta_c l}{2DF} m_1 = 0,637 \frac{\lambda \vartheta_c l}{D d_{\text{конф}}^2} m_1 \quad (4)$$

або

$$\Delta p = K_{\text{конф}} m_1, \quad (5)$$

де: $0,637 \frac{\lambda \vartheta_c l}{D d_{\text{конф}}^2} = K_{\text{конф}}$ – постійний коефіцієнт;

$d_{\text{конф}}$ – діаметр конфузори.

Отже, систему рівнянь (2) після перетворення за Лапласом і з урахуванням (5) можна представити у такому вигляді:

$$\begin{aligned} M_2 &= M_1, \\ P_2 &= P_1 - 0,637 \frac{\lambda \vartheta_c l}{D d_{\text{конф}}^2} M_1, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{або } P_2 = P_1 - K_{\text{конф}} M_1$$

де: $M_1 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_1}{m_{1н}} \right\}$, $M_2 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_2}{m_{2н}} \right\}$ – зображення за Лапласом відносних змін масової витрати природного газу на вході і виході конфузори;

$$P_1 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_1}{p_{1н}} \right\}, P_2 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_2}{p_{2н}} \right\} - \text{зображення за}$$

Лапласом відносних змін тиску газу на вході і виході конфузори;

$m_{1н}, m_{2н}$ – номінальні масові витрати природного газу на вході і виході конфузори;

$p_{1н}, p_{2н}$ – номінальні тиски газу на вході і виході конфузори.

Система рівнянь (6) може бути застосована для опису інших неоднорідностей, коли реальна пропускна здатність газопроводу зменшується, наприклад, за рахунок відкладення гідратів і конденсату, створення водяних пробок, потрапляння і накопичення піску, бруду, будівельного сміття тощо.

Відцентровий нагнітач. В результаті компримування газу на виході нагнітача (рис.3) відбувається підвищення тиску, яке можна описати такими співвідношеннями [10]:

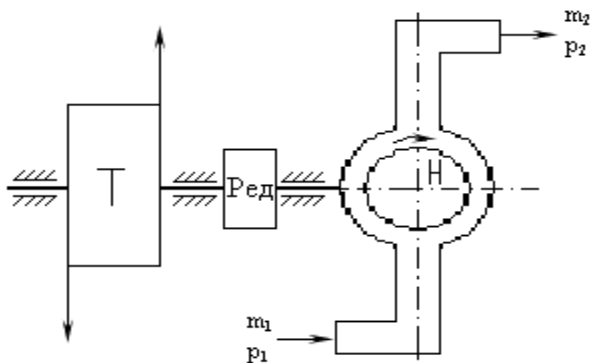
$$\begin{aligned} P_2 &= EP_1, \\ M_2 &= M_1, \end{aligned} \quad (7)$$

де: $P_1 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_1}{p_{1н}} \right\}$, $P_2 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_2}{p_{2н}} \right\}$ – зображення за Лапласом відносних змін тиску до і після нагнітача;

$$M_1 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_1}{m_{1н}} \right\}, M_2 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_2}{m_{2н}} \right\} – зображення$$

за Лапласом відносних змін масової витрати до і після нагнітача;

E – оптимальна ступінь стиснення газу у процесі його компримування.



T – турбоагрегат; *Ред* – газодинамічний зв'язок привода нагнітача; *H* – нагнітач

Рисунок 3 – Умовне зображення ГПА із відцентровим нагнітачем

Засувки. Масова витрата газу через засувку описується рівнянням [2]:

$$m_3 = \xi_3 F_3 (2\rho g (p_{13} - p_{23}))^{0.5}, \quad (8)$$

де: ξ_3 – коефіцієнт витрати;

F_3 – площа прохідного перерізу засувки;

p_{13}, p_{23} – абсолютні тиски до і після засувки відповідно;

g – прискорення земного тяжіння.

Рівняння (8) після лінеаризації і переходу до відхилень з урахуванням того, що $\xi_3 = const$ і $F_3 = const$ приймає такий вигляд:

$$M_3 = a_{13} P_{13} - a_{23} P_{23}, \quad (9)$$

де: $M_3 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta M_3}{m_{3н}} \right\}$ – зображення за Лапласом відносної зміни масової витрати;

$$P_{13} = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_{13}}{p_{13н}} \right\}, P_{23} = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_{23}}{p_{23н}} \right\} – зображення$$

за Лапласом відносних змін тисків до і після засувки відповідно;

$p_{13н}, p_{23н}$ – номінальні тиски газу до і після засувки.

Коефіцієнти a_{13}, a_{23} в рівнянні (9) визначаються за формулами [2]

$$a_{13} = \frac{p_{13н} \xi_3 F_3 (g(2ZRT)^{-1})^{0.5}}{(p_{13н}^2 - p_{13н} p_{23н})^{0.5} m_{3н}}, \quad (10)$$

$$a_{23} = \frac{p_{23н} \xi_3 F_3 (g(2ZRT)^{-1})^{0.5}}{(p_{13н}^2 - p_{13н} p_{23н})^{0.5} m_{3н}}. \quad (11)$$

Скориставшись очевидним твердженням, що масова витрата газу m_1 на вході засувки дорівнює масовій витраті газу на її виході m_2 , маємо

$$M_3 = M_2 = M_1, \quad (12)$$

де $M_1 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_1}{m_{3н}} \right\}$, $M_2 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_2}{m_{3н}} \right\}$ – зображення

за Лапласом відносних змін масової витрати до і після засувки відповідно.

Витоки. Для витоків газу (рис. 4) справедливі такі залежності:

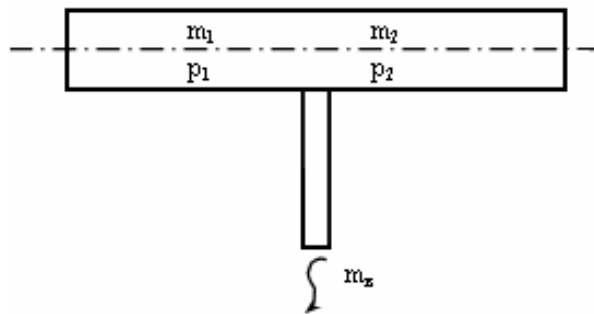


Рисунок 4 – Умовне зображення витоку газу з газопроводу

$$\begin{aligned} M_1 &= M_2 + M_6, \\ P_1 &= P_2, \end{aligned} \quad (13)$$

де: $M_1 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_1}{m_{6н}} \right\}$, $M_2 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_2}{m_{6н}} \right\}$ – зображення за Лапласом відносних змін масової витрати в газопроводі до і після отвору під час витоку відповідно;

$$P_1 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_1}{p_{6н}} \right\}, P_2 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_2}{p_{6н}} \right\} – зображення за$$

Лапласом відносних змін тиску в газопроводі до і після отвору відповідно.

Масова витрата природного газу через отвір визначається так [7]:

$$m_6 = (2\rho g (p_1 - p_{oc}))^{0.5} \xi_6 F_6, \quad (14)$$

де: p_1, p_{oc} – абсолютні тиски в газопроводі і оточуючому середовищі відповідно;

ξ_6 – коефіцієнт витрати;

F_6 – площа перерізу отвору в місці витоку.

Після лінеаризації рівняння (14) і переходу до відхилень отримаємо

$$M_6 = K_6 P_1, \quad (15)$$

де: $M_6 = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_6}{m_{6н}} \right\}$ – зображення за Лапласом відносної зміни масової витрати через отвір при витоках;

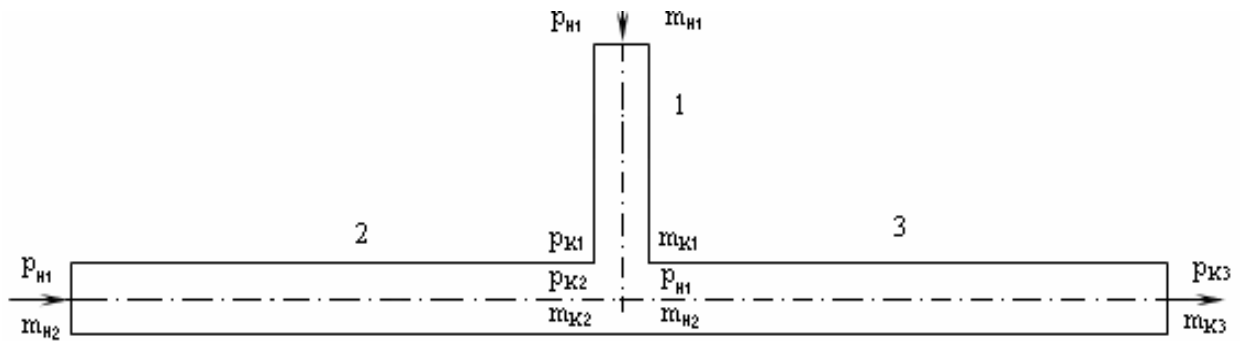


Рисунок 5 — Умовне зображення розгалуженого газопроводу

$P_e = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_e}{p_{1en}} \right\}$ – зображення за Лапласом відносної змін тиску до отвору.

$$K_e = \frac{p_{1en} \xi_e F_e (g(2ZRT)^{-1})^{0.5}}{(p_{1en}^2 - p_{1en} p_{oc})^{0.5} m_{en}} \quad (16)$$

Після підстановки M_e в рівняння (13) отримаємо

$$\begin{aligned} M_1 &= M_2 + K_e P_1, \\ P_1 &= P_2. \end{aligned} \quad (17)$$

З'єднання газопроводів

Для розгалужених газопроводів (рис.4) справедливі такі співвідношення для визначення зміни маової витрати і тиску:

$$\begin{aligned} M_{n3} &= M_{K1} + M_{K2}, \\ P_{n3} &= P_{K1} = P_{K2}, \end{aligned} \quad (18)$$

де: $M_{K1} = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_{K1}}{m_{K1n}} \right\}$, $M_{K2} = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta m_{K2}}{m_{K2n}} \right\}$ – зображення за Лапласом відносних змін масової витрати;

$P_{R1} = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_{R1}}{p_{R1n}} \right\}$, $P_{R2} = \mathcal{L} \left\{ \frac{\Delta p_{R2}}{p_{R2n}} \right\}$ – зображення за Лапласом відносних змін тиску.

Отримано математичні моделі елементів газопроводу, які дають змогу досліджувати газопровідну систему загалом, оскільки всі її елементи взаємозв'язані і зміна стану будь-якого з них призводить до зміни тиску і пропускної здатності як по довжині, так і в часі.

Література

- 1 Трубопровідний транспорт газу / М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Михалків, Д.Ф.Тимків, Л.С.Шлапак, О.М.Ковалко / За ред. М.П.Ковалка. – Київ: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600с.
- 2 Зельмат М.О. Методы исследования и управления режимами работы трубопроводного транспорта (на примере газотранспортной системы АНДР): Автореф. дис. д-ра техн. наук: / Моск. Акад. нефти и газа. – М., 1992. – 36 с.
- 3 Мислюк М.А., Зарубін Ю.О. Моделирование явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі: Навчальний підручник. – Івано-Франківськ: Екор, 1999. – 496 с.
- 4 Техническая кибернетика. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Кн. 2 / Под ред. В.В.Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 687с.
- 5 Семенов Г.Н. Теория автоматического керування: Підручник. – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – 610 с.
- 6 Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. – М.: Химия, 1974. – 344 с.
- 7 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 464 с.
- 8 Шумерский В.М., Зырялов Л.А. Инженерные задачи в нефтепереработке в нефтехимии. – М.: Химия, 1981. – 181 с.
- 9 Яковлев Е.И., Иванов В.А., Крылов Г.В. Системный анализ газотранспортных магистралей Западной Сибири. – М.: Наука, 1989. – 301 с.
- 10 Бобровский С.А., Щербаков С.Г., Яковлев Е.И., Гарляускас А.И., Грачев А.А. Трубопроводный транспорт газа. – М.: Наука, 1976. – 495 с.