

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ

¹В.Я. Грудз, ¹Я.В. Грудз, ²В.В. Рудко

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,
e-mail: koreyb@iifn.org.ua

² УМГ «Київтрансгаз», 01065, м. Київ, просп. Комарова, 44, тел. (044) 2397870
e-mail: rudko@ktg.com.ua

Дасться оцінка технічного стану елементів газоперекачувальних агрегатів на основі аналізу їх характеристик. З цією метою множину можливих станів агрегата розбито на підмножини, одна з яких об'єднує всі справні стани, друга – несправні, але працездатні, третя – стани відмови. Математична модель ГПА дозволяє з використанням теорії подібності і розмірностей побудувати безрозмірні комплекси, які разом з характеристиками елементів ГПА дозволяють оцінити належність технічного стану, ідентифікованого за результатами діагностування, до однієї з перелічених підмножин.

Ключові слова: технічний стан, діагностика, несправність

Дается оценка технического состояния элементов газоперекачивающих агрегатов по результатам анализа их характеристик. С этой целью множество возможных состояний агрегата разбито на подмножества, одно из которых объединяет все исправные состояния, другое – неисправные, но работоспособные, третья – состояния отказа. Математическая модель ГПА позволяет с использованием теории подобия и размерностей построить безразмерные комплексы, которые совместно с характеристиками ГПА позволяют оценить принадлежность технического состояния, идентифицированного по результатам диагностирования, к одному из перечисленных подмножеств.

Ключевые слова: техническое состояние, диагностика, неисправность

The estimation of the technical state of elements of aggregates is given for pumping over of gas on the basis of analysis of their descriptions. To that end the great number of all of the possible states of aggregate is broken on separate great numbers, one of which contains all of the in good condition states, other – defective, but capable of working, third are the states of refuse. The mathematical model of GPA allows with the use of theory of similarity and dimensions to build dimensionless complexes, which jointly with descriptions of GPA allow to estimate belonging of the technical state, identified on results diagnosticating, to one of the transferred great numbers.

Keywords: technical state, diagnostics, breakage

Газоперекачувальний агрегат як об'єкт діагностування є технічною системою з тривалими періодами безперервного функціонування. У ході експлуатації відбувається поступове погіршення його технічного стану, хоча загалом агрегат залишається працездатним. Поява несправностей в елементах ГПА, які з часом призводять до відмови обладнання, проявляється у погіршенні техніко-економічних показників роботи: зниженні потужності – N_e та коефіцієнта корисної дії – η_e , перевищенні витрати палива – G_T , а також зміні диференційних, робочих параметрів термогазодинамічних процесів. Так, у міжремонтні періоди потужність агрегата знижується на 10-30% внаслідок різних конструктивних та експлуатаційних причин. Як свідчать результати досліджень [1-4], збільшення зазорів між лопатями турбіни знижує потужність агрегату на 8%, поява твердих відкладів у осьовому компресорі – на 5%, перетони в ущільнювачах та забруднення вхідного тракту – на 1,5%.

Слід розрізняти такі підмножини станів агрегату:

K_1 – підмножина справних станів, коли агрегат задовольняє усім вимогам нормативно-

технічної документації – нормальна працездатність;

K_2 – підмножина несправних або аварійних станів – агрегат несправний, але працездатний;

K_3 – підмножина станів відмови – повна втрата працездатності;

$$K = K_1 \cup K_2 \cup K_3; \quad K_1 \subset K, K_2 \subset K, K_3 \subset K$$

Визначення множини допустимих станів агрегата, їх діагностичних ознак можливе тільки за наявності інформації про вплив розвитку несправностей на зміну технологічних процесів у вузлах агрегата. Під час розв'язання задач технічної діагностики зміну стану представляють у вигляді узагальненої функції [2, 3]:

$$R = f(\tilde{o}_1, \tilde{o}_2, \dots, \tilde{o}_n),$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – набір параметрів стану, що характеризують якість робочих процесів, що протікають в елементах агрегату у момент діагностування.

При розвитку несправності спостерігається певна закономірність зміни параметрів, що дає підстави стверджувати про закономірність у зміні стану агрегату. Розв'язання задач технічної діагностики складних технічних об'єктів, таких як газоперекачувальний агрегат, може бути отримане тільки шляхом аналізу множи-

ни станів, в яких ці об'єкти можуть перебувати в ході експлуатації. Складність та висока вартість ГПА є вагомою перешкодою для проведення натурального експерименту. У зв'язку з цим виникає потреба у розробленні спеціальних методів для теоретичного аналізу можливих станів на базі математичного моделювання, тобто аналітичного опису основних властивостей агрегату як об'єкта діагностування.

За відомої працездатності агрегата можна визначити її кількісну характеристику у вигляді енергетичної оцінки працездатності, тобто ефективної потужності – N_e , яку спроможний розвинути ГПА у залишковий ресурс. Така оцінка працездатності охоплює вихідні наведені характеристики. Верхньою границею є зона повної втрати працездатності ($N_{e \text{ гран.}}$), коли агрегат перестає виконувати свої функції. Границя нормальної (часткової) втрати працездатності визначається допустимими змінами ефективної потужності за залишковий ресурс агрегату, і, виходячи з досвіду експлуатації та техніко-економічних показників, приймається в межах 15% [4].

Математична модель для схеми газоперекачувального агрегату, що включає основні елементи агрегату: осьовий компресор (ОК), камеру згоряння (КЗ), регенератор (Р), турбіну високого тиску (ТВТ) і турбіну низького тиску (ТНТ), а також відцентровий нагнітач (ВН), базується основана на принципі структурної побудови та може бути представлена системою рівнянь, що описують:

- характеристики елементів;
- зв'язок між елементами;
- регулюючі пристрої.

До системи розрахунку характеристик включено:

- розрахунок характеристик осьового компресора;
- визначення параметрів потоку повітря та продуктів згоряння на кожному етапі тракту ГПА;
- визначення гідравлічних та теплових втрат у КЗ та регенераторі;
- визначення ефективної потужності, коефіцієнту корисної дії (ККД), питомої витрати палива;
- розрахунок характеристик нагнітача.

Численність вихідних незалежних змінних ускладнює побудову математичних моделей агрегату та його елементів. Будь-яку систему рівнянь, що виражає запис законів термогазодинаміки та керуючих впливів, можна сформулювати як співвідношення між безрозмірними величинами; іншими словами, згрупувавши незалежні змінні за певними законами в безрозмірні комплекси, можна отримати адекватну математичну модель агрегату.

У ході аналізу процесів методом теорії розмірності складається таблиця основних фізичних величин та розмірних категорій у векторній системі для процесів стискання та розширення робочого тіла у лопатевих машинах. До фізичних величин, що є визначальними у даній постановці задачі, слід віднести масову витрату

газу через машину G , тиск гальмування P та абсолютну температуру T , кутову швидкість ротора або силового валу, коефіцієнт в'язкості робочого тіла – μ , діаметр робочого колеса – D , а також газу постійну R та показник адіабати K . Крім того, виходячи з припущення, що внутрішній теплообмін несуттєво впливає на робочий процес, до фізичних параметрів не включені питома теплоємність C_y та коефіцієнт теплопровідності середовища λ . Для нагнітача до величин, що суттєво впливають на його роботу, включений коефіцієнт стисливості Z .

Залежність ступеня підвищення тиску від інших величин можна подати рядом однорідних за розмірністю членів виду

$$\varepsilon, \eta, \tau = C \cdot G^a \cdot T^b \cdot P^c \cdot n^d \times \times D^e \cdot K^f \cdot R^g \cdot \mu^m \cdot Z^n, \quad (1)$$

де C – коефіцієнт пропорційності.

Застосувавши основну теорему теорії розмірностей, отримаємо

$$\varepsilon = C_1 \left[\frac{G\sqrt{RTZ}}{D^2P} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sqrt{RTZ}\mu}{DP}\right)^3} \cdot \left(\frac{\omega D}{\sqrt{RTZ}}\right) \right] \phi(K) \quad (2)$$

У формулі (2) співмножники пропорційні:

$\frac{G\sqrt{RTZ}}{D^2P}$ – приведеній осьовій швидкості;

$\frac{\sqrt{RTZ}\mu}{DP}$ – числу Рейнольдса;

$\frac{\omega D}{\sqrt{RTZ}}$ – приведеній коловій швидкості.

При роботі лопатевої машини з використанням ідентичного робочого тіла рівняння (2) набуде вигляду:

$$\varepsilon = C_2 \left[\frac{G\sqrt{RTZ}}{D^2P} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sqrt{RTZ}\mu}{DP}\right)^3} \cdot \left(\frac{\omega D}{\sqrt{RTZ}}\right) \right]^g$$

Застосувавши метод перетворення критеріїв, отримаємо безрозмірні комплекси

$$\frac{G\sqrt{RTZ}}{D^2P} \cdot \sqrt{\frac{\omega D}{\sqrt{RTZ}}} \quad \text{та} \quad \sqrt{\left(\frac{\sqrt{RTZ}\mu}{DP}\right)^3}$$

Втрати на тертя, що залежать від числа Re малі в порівнянні з втратами від утворення вихорів, відривів потоку, вторинних течій. Для кожної конкретної проточної частини завжди знайдеться таке значення $Re_{\text{адд.}}$, вище якого течія в ступені буде автотельною [5]. Для лопатевої машини в області автотельності за

числом Рейнольдса параметр $\sqrt{\left(\frac{\sqrt{RTZ}\mu}{DP}\right)^3}$ є несуттєвим.

Таким чином, серед визначальних критеріїв залишаються лише критерії

$$\frac{G\sqrt{RTZ}}{D^2 P} \cdot \sqrt{\frac{\omega D}{\sqrt{RTZ}}}, g.$$

Далі, для зручності використання доцільно ввести замість безрозмірного параметру g приведену витрату $G_{i\delta}$ або приведені оберти $n_{i\delta}$ та провести перетворення параметру $\frac{G\sqrt{RTZ}}{D^2 P} \cdot \sqrt{\frac{\omega D}{\sqrt{RTZ}}}$ за допомогою параметру ε . В результаті для лопатевих машин, що працюють на одному й тому ж робочому тілі, в зоні автономності за числом Рейнольдса, визначальними залежностями є

$$\varepsilon = f_1 \left(\frac{G_{np} n_{np}^2}{\varepsilon}, G_{np} \right), \varepsilon = f_2 \left(\frac{G_{np} n_{np}^2}{\varepsilon}, n_{np} \right). (3)$$

Для визначення коефіцієнту корисної дії турбомашин проводиться перетворення параметру $\frac{G_{np} \cdot n_{np}^2}{\varepsilon}$.

$$\frac{G_{np} \cdot n_{np}^2}{\varepsilon}$$

Згідно з правилами перетворення критеріїв, до визначальних критеріїв має входити також параметр η , тобто

$$\varepsilon = f_3 \left(\frac{G_{np} n_{np}^2}{\varepsilon \eta}, G_{np}, \eta \right), \varepsilon = f_4 \left(\frac{G_{np} n_{np}^2}{\varepsilon \eta}, n_{np}, \eta \right). (4)$$

У свою чергу, коефіцієнт корисної дії η аналогічно ступеню підвищення тиску ε є функцією двох параметрів $\frac{G_{np} n_{np}^2}{\eta}$ та $G_{np} (n_{np})$.

$$\frac{G_{np} n_{np}^2}{\eta} \text{ та } G_{np} (n_{np}).$$

Після перетворення $\frac{G_{np} n_{np}^2}{\eta}$ за допомогою ε отримаємо

$$\eta = f_5 \left(\frac{G_{np} n_{np}^2}{\varepsilon \eta}, G_{np}, \varepsilon \right); \eta = f_6 \left(\frac{G_{np} n_{np}^2}{\varepsilon \eta}, n_{np}, \varepsilon \right). (5)$$

Враховуючи рівняння (4) співвідношення (5) можна привести до вигляду

$$\varepsilon = f_7 \left(\frac{G_{np} n_{np}^2}{\varepsilon \eta}, G_{np} \right); \varepsilon = f_8 \left(\frac{G_{np} n_{np}^2}{\varepsilon \eta}, n_{np} \right). (6)$$

Аналогічні перетворення параметрів можна виконати, використовуючи величину τ – відношення кінцевої температури процесу до початкової – як визначальну. Але при цьому необхідно відмітити наступне.

Характеристики будь-якої лопатевої машини за умови геометричної, газодинамічної та теплової подібності можуть бути виражені

будь-якими двома наведеними параметрами. У завданні, що розглядається, за такі параметри взято ε та η . В свою чергу, кожний з вихідних параметрів лопатевої машини є функцією двох незалежних аргументів, в якості яких доцільно використовувати комплексний параметр, а також частоту обертання або витрату повітря, приведені за параметрами на вході до початкових умов. Оскільки незалежних параметрів тільки два, то записувати більшу кількість рівнянь для задання характеристики лопатевої машини (за умови справедливості подібності) немає сенсу: зайві рівняння не несуть необхідної інформації та обтяжують побудову математичної моделі агрегата.

Таким чином, для газоперекачувального агрегата будь-якої схеми в зоні експлуатації, в якій справедливі принципи теорії подібності, число рівнянь, що визначають характеристики елементів агрегата, дорівнює подвоєному числу елементів, що розглядаються.

Характеристики нагнітача, осьового компресора та турбіни в зазначеній системі параметрів є з достатньою точністю наближення лінійними у всьому діапазоні режимів роботи ГПА. Лінійність характеристик дає змогу з високою точністю апроксимувати їх рівняннями першого ступеня у вигляді:

$$A = \frac{a_1 n_{np} - a_2 \varepsilon^* + a_3}{a_4 \varepsilon + a_5}, B = \frac{b_1 G_{np} - b_2 n_{np} - b_3}{b_4 G_{np} - b_5}.$$

Можливість апроксимації характеристик лопатевої машини лінійними залежностями полегшує їх використання для вирішення завдань технічної діагностики.

Література

1 Иванов И.А. Исследование и прогнозирование характеристик газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом при трубопроводном транспорте газа: дисс. канд. техн. наук. – М., 1978. – 119 с.

2 Морозов В.И. О причинах снижения мощности газотурбинных агрегатов в процессе эксплуатации / [В.И. Морозов, В.А. Щуровский, В.И. Корнев] // Транспорт и хранение газа. – 1971. – № 10. – С. 13-19.

3 Пятахина Т.Т. Влияние эрозии проточной части центробежных нагнетателей на их газодинамические характеристики / [Т.Т.Пятахина, Ю.Н. Сеницын, В.А. Щуровский, В.И.Ефанов] // Транспорт и хранение газа, 1975. – № 6. – С. 8-13.

4 Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины / В.Ф. Рис. – М.-Л.: Машиностроение, 1964. – 335 с.

5 Ковалко М.П. Трубопроводный транспорт газа / [М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін.]. – Київ: АренаЕКО, 2002. – 600 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
09.02.11

Рекомендована до друку професором
Тимківим Д.Ф.