

УДК 621.515.(088.8)

С.Г. Тихомиров, проф., д-р техн. наук

Д.В. Арапов, доц., канд. техн. наук

С.С. Саввин, асп.

(ФГБОУ ВО ВГУИТ, г. Воронеж)

В.А. Курицын, канд. техн. наук,

(ЗАО «НПП «Центравтоматика», г. Воронеж)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНТИПОМПАЖНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПРЕССОРОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

В системах, включающих компрессоры динамического действия (КДД), трубопроводы, емкости при определенных сочетаниях форм характеристик КДД и сети могут возникать и оставаться после снятия возмущения колебания подачи, напора и мощности. Эти автоколебания носят название «помпаж». Возникновение помпажа в современных высокодинамичных системах представляет большую опасность, так как это приводит к разрушению элементов системы и аварийному выбросу опасного газа в окружающую среду. Другим аварийным режимом, приводящем к поломке КДД, является торможение, вплоть до полной остановки, движущейся массы сжатого газа в межлопаточных каналах ротора, когда при достижении критических скоростей дальнейшее увеличение подачи газа оказывается невозможным. В этой связи важнейшей функцией системы автоматизации компрессорного агрегата является защита от режимов помпажа и торможения.

База знаний антипомпажной системы управления КДД (рис. 1) состоит из баз данных (блоки 1-4) и математического обеспечения.

Для расчета реального состояния промышленных газов используются (блок 5) уравнения Бенедикта – Вебба – Рубина (БВР), Ли – Эрбара – Эдмистера, Суги – Лю [1]. Первое служит для расчета волюметрических свойств газовой смеси и энтропии, второе – для определения энтальпий, третье – для расчета свойств неуглеводородных газов, если они входят в состав газовой смеси. Для холодильных паров наряду с БВР применено вириальное уравнение Боголюбова – Майера [2,3], представляющее собой степенной полином, описывающий зависимость коэффициента сжимаемости от плотности пара. Уравнения состояния решаются методом последовательных приближений.

Параметры, рассчитанные по уравнениям состояния, используются для контроля и диагностики состояния КДД (блок 9), а также в формулах (1), (2) приведения текущей степени сжатия к паспортной и наоборот (блок 6) паспортной степени сжатия к текущим условиям

всасывания. Приведение осуществляется согласно условия сохранения подобия треугольников скоростей рабочего колеса ротора в среднем и в характерных сечениях компрессора [4]:

$$\pi_{np} = \left[\left(\pi^{\frac{k-1}{\eta_n \cdot k}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\omega_{nc}}{\omega_{uz}} \right)^2 \cdot \left(\frac{k_{nc} - 1}{k - 1} \right) \cdot \frac{k \cdot z_{вс} \cdot R \cdot T_{вс}}{k_{nc} \cdot z_{nc} \cdot R_{nc} \cdot T_{nc}} + 1 \right]^{\frac{\eta_n \cdot k_{nc}}{k_{nc} - 1}}, \quad (1)$$

$$\pi_{nc}^{mek} = \left[\left(\pi^{\frac{k_{nc} - 1}{\eta_n \cdot k_{nc}}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\omega_{uz}}{\omega_{nc}} \right)^2 \cdot \left(\frac{k - 1}{k_{nc} - 1} \right) \cdot \frac{k_{nc} \cdot z_{nc} \cdot R_{nc} \cdot T_{nc}}{k \cdot z_{вс} \cdot R \cdot T_{вс}} + 1 \right]^{\frac{\eta_n \cdot k}{k - 1}}, \quad (2)$$

где π_{np}, π_{nc}^{mek} - приведенная к паспортным условиям всасывания текущая и паспортная степень сжатия соответственно; π_{nc} - паспортное значение степени сжатия; π - текущая степень сжатия, равная отношению абсолютных давлений нагнетания и всасывания; ω_{nc}, ω_{uz} - паспортное и текущее измеренное значение скорости вращения ротора компрессора; k_{nc}, k - паспортное и расчетное текущее значение показателя изэнтропы газа; R_{nc}, R - паспортное и расчетное текущее значение газовой постоянной; $T_{nc}, T_{вс}$ - паспортное и текущее значение абсолютной температуры газа на всасе компрессора; $z_{nc}, z_{вс}$ - паспортное и расчетное текущее значение коэффициента сжимаемости газа на всасе компрессора; η_n - текущее значение политропного коэффициента полезного действия.

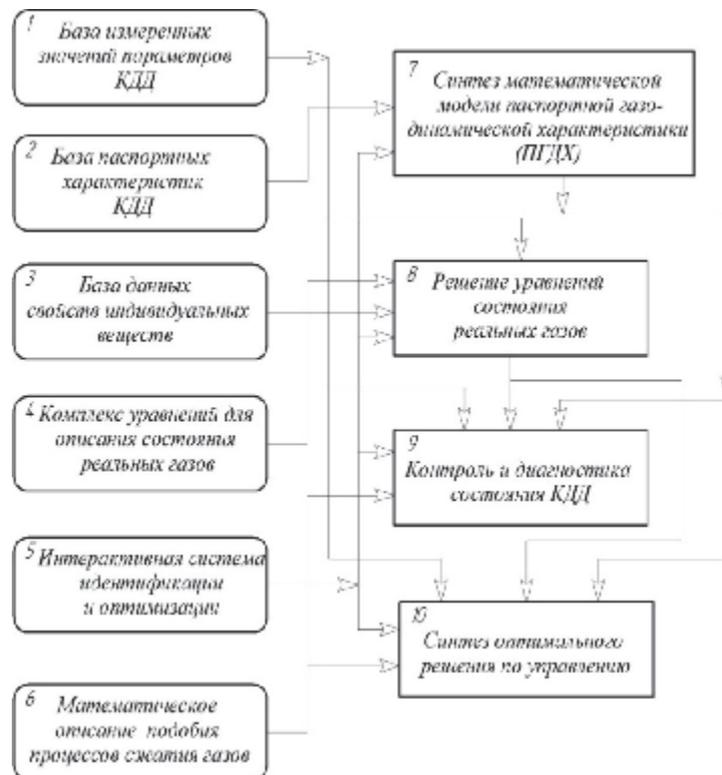


Рисунок 1 – Структура базы знаний антипомпажной системы управления

На основе формул (1) или (2) формируется переменная для антитомпажного регулятора.

Структуры моделей ПГДХ, наиболее употребляемых КДД можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 & 1) \text{ ПГДХ КДД с входной регулирующей дроссельной заслонкой:} \\
 & \pi_{nc} = a_1 + a_2 \cdot Q \cdot \sin\psi \cdot \exp(a_3 \cdot Q \cdot \sin\psi) + a_4 \cdot Q \cdot \exp(a_5 \cdot Q) + a_6 \cdot \sin\psi \times \\
 & \times \exp(a_7 \cdot \sin\psi) + a_8 \cdot Q \cdot \cos\psi \cdot \exp(a_9 \cdot Q \cdot \cos\psi) + a_{10} \cdot (Q \cdot \sin\psi)^{a_{11}} \times \\
 & \times \exp[a_{12}(Q \cdot \sin\psi)^{-1}] / \{a_{13} \cdot \exp[a_{14} \cdot (Q \cdot \sin\psi)^{-1}] + \\
 & + Q^{a_{15}} \cdot \sin^2\psi / (a_{16} - \sin^2\psi)\},
 \end{aligned} \quad (3)$$

где Q – объемный расход сжимаемого газа, $м^3 / с$; $a_1 - a_{16}$ – коэффициенты, ψ – угол открытия дроссельной заслонки.

Паспортные линии помпажа и торможения аппроксимируются зависимостями:

$$\pi_{nc}^{nm} = \alpha_1 + \alpha_2 Q_{nm}; \quad \pi_{nc}^{mp} = \beta_1 + \beta_2 Q_{mp}. \quad (4)$$

Отдельные точки линий помпажа и торможения определяются из решения соответственно уравнений:

$$d\pi_{nc} / dQ = 0; \quad d\pi_{nc} / dQ = 1, \quad (5)$$

при заданных углах открытия дроссельной заслонки.

2) ПГДХ КДД с регулируемым приводом:

$$\begin{aligned}
 \pi_{nc} = & a_1 + a_2 q + a_3 n + a_4 q^2 + a_5 n^2 + a_6 qn + a_7 \sqrt{qn} + \\
 & + a_8 / (qn) + a_9 (qn)^2; \quad q = Q / 1000; \quad n = N / 1000,
 \end{aligned} \quad (6)$$

где N – скорость вращения ротора компрессора, $об / мин$; $a_1 - a_9$ – коэффициенты регрессии.

Отдельные точки линий помпажа и торможения определяются по формуле (5) при заданных частотах вращения привода турбокомпрессора.

3) ПГДХ КДД с нерегулируемым электроприводом:

$$\begin{aligned}
 \pi_{nc} = & a_1 + a_2 \cdot q^{0,5} + a_3 \cdot q^2 + a_4 \cdot q^3 + a_5 \cdot q^4 + a_6 \cdot q^5 + \\
 & + a_7 \cdot q^6 + a_8 \cdot q^7 + a_9 \cdot q^8 + a_{10} \cdot q^9 + a_{11} \cdot q^{-1,5}
 \end{aligned} \quad (7)$$

Линии помпажа и торможения рассчитываются по формулам (4), (5).

Для решения задач идентификации математических моделей и оптимизации разработана (модуль 5) интерактивная система, которая включает в себя метод Гаусса для решения систем линейных уравнений, генетический алгоритм и метод Хука-Дживса – для решения задач нелинейного программирования, алгоритм нейронной сети радиальных базисных функций (RBF) – для определения модели типа «черный ящик», а также развитый интерфейс для пользователя системой. Система реализована на языке программирования C# в среде

в среде MS VisualStudio 2010.

ПГДХ аппроксимируются таким образом, чтобы среднеквадратичная оценка относительной погрешности на всем диапазоне определения степени сжатия была менее $\pm 1,0\%$. Это необходимо для точного определения точек помпажа и торможения потока газа и соответствующих им точек заданного запаса устойчивости (ЗЗУ) к помпажу и торможению. В противном случае назначение ЗЗУ теряет смысл, так как он будет реализовываться с большой и непостоянной погрешностью.

Синтез оптимального решения по управлению включает расчет задания антипомпажному регулятору, который формируется в блоке 10 на основе ЗЗУ и моделей ПГДХ. При резком изменении расхода газа потребителем, автоматически, с предварением увеличивается значение ЗЗУ от первоначального до максимального подбираемого экспериментально. Соответственно этому увеличивается или уменьшается задание регулятору степени сжатия [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / Р. Рид., Дж. Праусниц, Т. Шервуд / пер. с англ. под ред. Б.И. Соколова. – 3-е изд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
2. Пластинин, П.И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет / 2-е изд.-М.: Колос, 2000. – 456 с.
3. Бухарин, Н.Н. Моделирование характеристик центробежных компрессоров / Н.Н. Бухарин. – Л.: Машиностроение, 1983. – 214 с.
4. Рис, В.Ф. Центробежные компрессорные машины / В.Ф. Рис. – 3-е изд. перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1981. – 351 с.
5. Пат. 2434162 Российская федерация, МКИ F04 D27/2. Способ защиты компрессора от помпажа [Текст] / В.А. Курицын, Д.В. Арапов, Е.И. Пеганов [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Нижнекамнефтехим». – 2010119101/06; заявл. 11.05.2010; опубл. 20.11.2011, Бюл. №32 (Ч.III).