XXXIV Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции.
Ч.II: С.93-94, 2006.

УДК 621.515.001.5

Н.В.Круглов (5 курс, каф. КВХТ), М.Х.Нгуен (асп., каф. КВХТ), Р.А.Измайлов, д.т.н., проф.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ И КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ СРЫВА И ПРЕДСРЫВА В ЦЕНТРОБЕЖНОМ КОМПРЕССОРЕ

Помпаж – недопустимое явление для работы турбокомпрессоров [1]. Он оказывает катастрофическое воздействие на рабочие характеристики и состояние центробежного компрессора. Поэтому помпажа необходимо избегать при эксплуатации турбокомпрессоров.

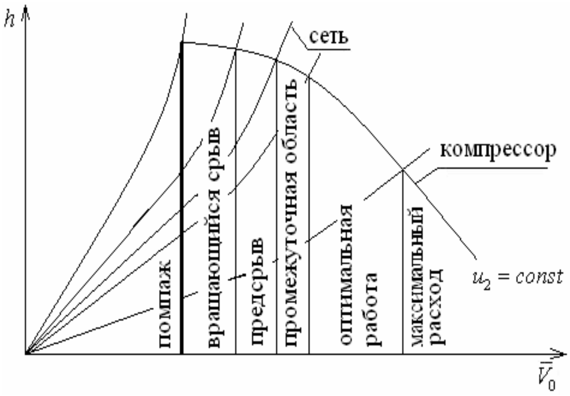

Рис. 1. Характеристика «напор-расход» центробежного компрессора

Характеристику «напор-расход» центробежного компрессора можно разделить на 6 областей: максимальный расход, оптимальная работа, промежуточная (между оптимальной работой и предсрывом), предсрыв, вращающийся срыв и помпаж (рис. 1). Разбиение области предпомпажного состояния на вращающийся срыв и предсрыв и своевременное обнаружение момента их возникновения позволяет надежнее защитить установку от помпажа. Это особенно важно для тех центробежных компрессоров, у которых границы возникновения вращающегося срыва и помпажа почти совпадают.

Вращающийся срыв характеризуется вращением (перемещением по угловой координате) пространственных зон с областями обратного тока в проточной части центробежного компрессора, при этом частота вращения зон срыва ниже частоты вращения ротора. Пульсации давления при вращающемся срыве имеют периодический характер. При предсрыве периодическая составляющая пульсаций давления неустойчива. Исходя из этого, задача обнаружения вращающегося срыва и предсрыва сводится к задаче обнаружения периодичностей в пульсациях давления в проточной части центробежного компрессора.

Для решения поставленной задачи обнаружения периодичностей в сигнале, полученном от установленного в проточной части компрессоре датчика давления, будем использовать сингулярное разложение и автокорреляционную функцию.

Сингулярное разложение является важнейшим элементом в сингулярном спектральном анализе (ССА) [2,3]. ССА служит для анализа структуры временных рядов [2-5]. Для исследования структуры заданного временного ряда (сигнала) сначала проводится вложение его в траекторную матрицу. Рассматривается вещественнозначный ненулевой временной ряд длины N $(N > 2)$ $F = (f_0, f_1, \ldots, f_{N-1})$. Пусть L – некоторое целое число $1 < L < N$; $K = N - L + 1$. Траекторная матрица $X(L\text{x}K)$ получается следующим образом: $X = (x_{ij})_{i,j=1}^{L,K} = (f_{i-1}, \ldots, f_{i+L-2})^T$, $1 \le i \le K$. Результат сингулярного разложения траекторной матрицы X: $X = U\Lambda V^T$, где диагональные элементы матрицы $\Lambda(L\text{x}K)$ $\lambda_i = \Lambda_{ii}$ ($i = 1, \ldots, L$) являются сингулярными числами матрицы X, а $\Lambda_{ij} = 0$, если $i \ne j$; столбцы матрицы U $(L\text{x}L)$ образуют ортонормированный базис из собственных векторов матрицы XX^T; а столбцы матрицы $V(K\text{x}K)$ образуют ортонормированный базис из собственных векторов матрицы X^TX. Пусть $d = \max\{i: \lambda_i > 0\}$, тогда $X = X_1 + \ldots + X_d$, где $X_i = \lambda_i U_i V_i^T$. Набор ($\lambda_i$, U_i, V_i) называется собственной тройкой сингулярного разложения.

Для исследования структуры исходного ряда F, т.е. для выяснения составляющих, содержащихся в F, достаточно изучать диагональные элементы матрицы Λ и столбцы матрицы U. Если столбцы матрицы U соответствуют трендам, периодическим (гармоническим) или шумовым составляющим, то можно заключить, что исходный ряд F содержит такие компоненты. Каждой периодической составляющей исходного ряда соответствует одна пара собственных троек, сингулярные числа которых близки по значению (необходимое условие), $\lambda_i/\lambda_{i+1} \approx 1$ (1).

Автокорреляционная функция (АКФ) сигнала x(t) определяется следующим образом: $R_{xx}(\tau) = \lim\limits_{T\to+\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt$, где τ – сдвиг по времени. Для временного ряда конечной длины N ($N > 1$) $x = (x_0, x_1, \ldots, x_{N-1})$: $R_{xx}(m) = \dfrac{1}{N-m} \sum\limits_{n=0}^{N-m-1} x_n x_{n+m}$, $m = 0, 1, 2, \ldots, N-1$ [6]. Справедливо неравенство $R_{xx}(m) \leq R_{xx}(0)$. На практике часто применяют нормированную АКФ (или функцию коэффициента корреляции) $r_{xx}(m) = R_{xx}(m)/R_{xx}(0)$. Тогда $r_{xx}(0) = 1$ и $-1 \leq r_{xx} \leq 1$. Если обозначать E_i (i = 1, 2, 3…) – экстремальное значение r_{xx}, то для периодического ряда $|E_i| > |E_{i+1}|$ (2) и $E_i . E_{i+1} \leq 0$ (3). Расстояние T = E_{i+2} - E_i равно периоду периодического ряда.

Итак, для обнаружения вращающегося срыва и предсрыва в центробежном компрессоре, сначала сигнал, полученный от датчика давления, подвергается вложению в траекторную матрицу, затем проводится сингулярное разложение для этой матрицы. Дальше проверяется выполнение условия (1) для наиболее значимых сингулярных чисел. Если условие (1) выполняется для λ_i и λ_{i+1}, тогда проверится выполнение условий (2) и (3) для U_i и U_{i+1}. Если условия (1), (2), (3) одновременно выполняются, то сигнал содержит периодическую составляющую. Если эта периодическая составляющая непрерывно появляется в полученном от датчика давления сигнале, то это говорит о возникновении вращающегося срыва в проточной части компрессора. Если эта периодичность имеет неустойчивый характер, это означает, что компрессор находится в состоянии предсрыва. Предлагаемый подход реализован авторами в среде платформы Matlab с использованием алгоритма метода «Гусеница» [2]. Для расчета были использованы экспериментальные данные по исследованию нестационарных процессов в центробежном компрессоре. Полученные результаты подтверждают применяемость изложенного подхода.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Измайлов Р.А Нестационарные аэродинамические процессы в центробежных компрессорах: Дисс. д.т.н. / ЛПИ им. Калинина. – Л., 1987. – 340 с.
2. Главные компоненты временных рядов: метод "Гусеница" / Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. – СПб: Издательство Санкт-Петербургского университета, 1997. – 307 с.
3. Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljaavsky A. Analysis of Time Series Structure: SSA and related techniques. Chapman & Hall/CRC, 2001. – 305 p.
4. Broomhead D.S. and King G.P. Physica D, 20:217–236, 1986.
5. Broomhead D. S. and King G. P. On the qualitative analysis of experimental dynamics systems. In S. Sarkar (Ed.), Nonlinear Phenomena and Chaos, pp. 113–144. Adam Hilger, Bristal, 1986.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540с.