

ПРИМЕНЕНИЕ КАРТИН ВОЗВРАТА И РЕКУРРЕНТНОГО  
КВАНТИФИКАЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ  
СРЫВА И ПОМПАЖА В ЦЕНТРОБЕЖНОМ КОМПРЕССОРЕ

Вращающийся срыв и помпаж в компрессоре относятся к нестационарным процессам. При помпаже существуют мощные флуктуации, создаваемые помимо окружной неравномерности аэродинамических величин обратным течением газа через проточную часть, что создаёт повышенные нагрузки на компрессор и на установку в целом. Граница помпажа определяется формой характеристик компрессора и сети и, как правило, находится в области расходов меньших по сравнению с границей вращающегося срыва и значительно меньших оптимального. Поэтому обычно помпажу предшествует интенсивный вращающийся срыв. Вращающийся срыв – самовозбуждающаяся, неустановившаяся асимметрия потока, возникающая из-за отрыва потока в проточной части. Процесс проявляется в виде периодических низкочастотных регулярных пульсаций давления и скорости [1].

Анализируя пульсации давления, скорости, возникающие при вращающемся срыве, можно разработать численные критерии, с помощью которых удастся создать алгоритм антипомпажной защиты.

Метод Картин Возврата (Recurrence Plot, RP) был разработан относительно недавно – в 1987 Экманом. Это двумерный способ визуализации повторов состояний некоего процесса  $x_i$  в фазовом пространстве. Наибольший интерес представляет не сама картина возврата (она лишь служит для начальной интерпретации данных, их предварительного анализа), а ее численный анализ - рекуррентный квантификационный анализ (recurrence quantification analysis, RQA), разработанный Збиллитом и Веббером и дополненный новыми приемами Марваном [2].

В качестве платформы для расчета использована среда Matlab. Базовый пакет применительно к RQA, Cross Recurrence Plot Toolbox for Matlab 5.12. (разработчик Норберт Марван, Германия). Программа позволяет получать картины возврата и проводить их численный анализ.

Для обработки использованы сигналы пульсаций давления, полученные при проведении серии испытаний под названием “KZ” на модели первой ступени нагнетателя 395-21-1 ПО “Невский завод”. Наиболее интенсивно пульсации давления проявляются на входе и на выходе из диффузора [3]. Поэтому обрабатывались сигналы, полученные с датчиков, установленных в этих местах. Рассмотрены результаты испытаний при  $U_2 = 202$  м/с. Исследованы 4 режима со следующими коэффициентами расхода:  $\Phi_1 = 0,053$ ,  $\Phi_2 = 0,046 \approx \Phi_{\text{опт}}$ ,  $\Phi_3 = 0,038$  и  $\Phi_4 < 0,038$ . Режим 1 лежит в области повышенного расхода, режим 2 - в области оптимального расхода, режимы 3 и 4 в области вращающегося срыва и интенсивного вращающегося срыва соответственно. С помощью визуального анализа карты возврата были подобраны параметры: пороговое отклонение значений  $\varepsilon$  и размерность фазового пространства –  $m$ . Для всех режимов было принято значение  $m = 2$ ,  $\varepsilon = 0,5$ . При таких параметрах отчетливо видно появление устойчивой периодической составляющей на режиме вращающегося срыва (рис. 1 (б)). Для режимов 1, 2 устойчивых периодических пульсаций давления не наблюдается (рис. 1 (а)). При выбранных параметрах  $m$  и  $\varepsilon$  по методу RQA были вычислены величины, характеризующие полученные картины возврата. После обработки всех режимов была определена зависимость критериев от режима работы компрессора и сделан вывод о пригодности метода для создания численных критериев возникновения вращающегося срыва. К численным критериям следует отнести 3 параметра: детерминизм (доля восстановленных точек, формирующих диагональные линии), ламинарность (доля восстановленных вертикальных линий) и энтропию распределения длин диагональных

линий. Прослеживается зависимость по увеличению данных параметров при появлении вращающегося срыва. Данные, полученные при расчете, сведены в табл. 1. Таким образом, возможна разработка алгоритма антипомпажной защиты на базе метода RQA.

Таблица 1. Параметры картины возврата при различных режимах работы компрессора.

Расход, $\Phi$	вход в диффузор			выход из диффузора		
	Детерминизм	энтропия	ламинарность	детерминизм	энтропия	ламинарность
0,0530	0,488	0,804	0,187	0,493	0,815	0,241
0,046	0,474	0,81	0,159	0,486	0,799	0,218
0,038	0,516	0,907	0,32	0,5	0,888	0,252
<0,038	0,518	0,915	0,31	0,575	1,0	0,397

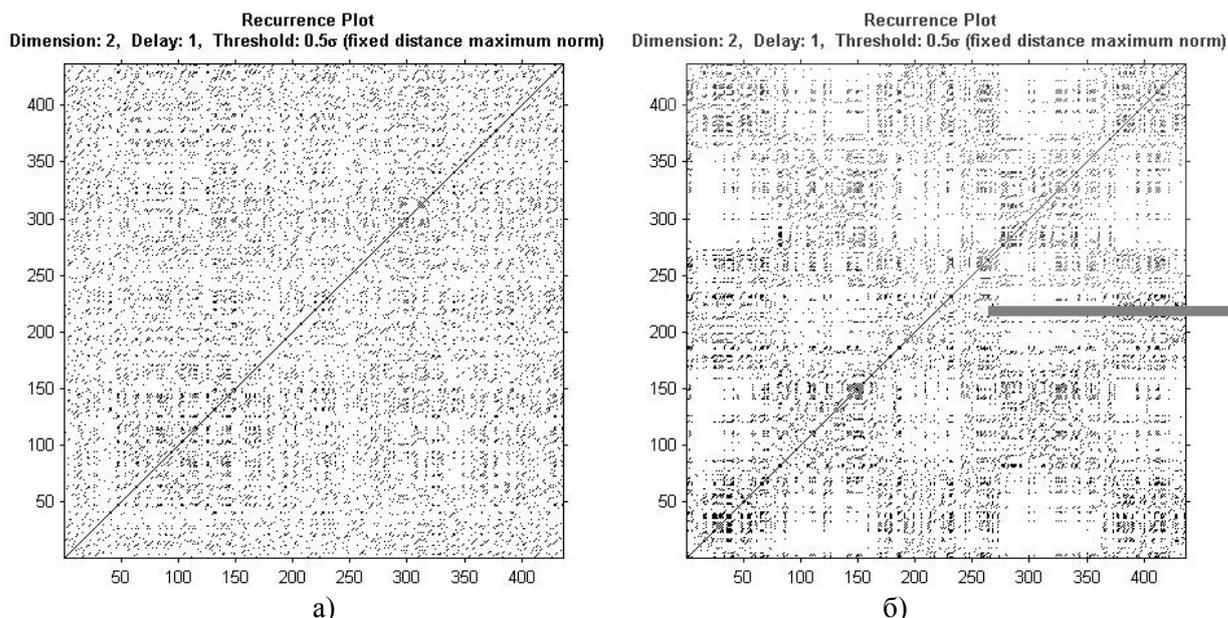


Рис. 1. Картины возврата (а - режим 2 ( $\Phi_2 = 0,046$ ), вход в диффузор; б - режим 4 ( $\Phi_4 < 0,038$ ), вход в диффузор)

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Измайлов Р.А. Нестационарные процессы в центробежных компрессорах. /дис. док. тех. наук/ СПбГПУ. – Ленинград 1987.
2. Marwan N.: Encounters With Neighbours - Current Developments Of Concepts Based On Recurrence Plots And Their Applications, Ph.D. Thesis, University of Potsdam.
3. Нгуен Минь Хай. Информативные критерии для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора / дис .канд. тех. Наук / СПбГПУ. – СПб., 2007.