

# Экспериментальное определение границы помпажа центробежных компрессоров с масляными и электромагнитными подшипниками без ввода их в помпаж

Я.З. Гузельбаев, А.Л. Хавкин

(АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС)

Рассмотрены особенности создания сигнализаторов помпажа для проведения помпажных испытаний центробежных компрессоров, основанных на обнаружении врачающегося срыва, предшествующего помпажу.

**Ключевые слова:** центробежный компрессор, помпаж, врачающийся срыв, сигнализатор помпажа.

**Experimental determination of the surge limit of centrifugal compressors with oil and electro-magnetic bearings without entering into surging**

Я.З. Гузельбаев, А.Л. Хавкин

(JSC «NIIturbocompressor n.a. V.B. Shnepp», HMS Group)

The special aspects are considered of development surge warning devices for conducting surge tests of centrifugal compressors based on the detection of rotating stall preceding the surging.

**Keywords:** centrifugal compressor, surge, rotating stall, surge detector.

Одним из важных этапов при приемо-сдаточных испытаниях центробежных компрессорных установок (ЦКУ) на заводе-изготовителе и при приемочных испытаниях на объекте у Заказчика является проведение помпажных испытаний, при которых на газодинамической характеристике заносятся координаты нескольких точек границы устойчивой зоны работы компрессора и по ним строится линия границы помпажа [1]. Эти данные необходимы для построения автоматической системы антипомпажного регулирования.

При проведении газодинамических расчетов на характеристиках ЦКУ указываются положения границы помпажа как на модельном газе, например, на воздухе, так и на реальном газе, но они носят предварительный характер и требуют экспериментальной проверки.

В прежние годы, при проведении помпажных испытаний, компрессор вводили в помпаж, как минимум три раза, при различных частотах вращения, либо при разных положениях дроссельной заслонки или входного регулирующего аппарата (ВРА). Эти испытания проводили опытные, высококлассные специалисты, так как при их неправильных действиях элементы компрессора могли выйти из строя: в первую очередь, стирание и разрушение уплотнений, подшипников, задевание рабочих колес о статорные элементы и т.п.

Таким образом была поставлена задача, для помпажных испытаний создать надежное и быстродействующее устройство для определения границы помпажа, входящего в состав штатной системы защиты ЦКУ от помпажа.

Работы по созданию систем защиты от помпажа проводились в двух направлениях: создание систем антипомпажного регулирования, при которых рабочая точка не допускалась левее линии границы помпажа за счет аналогового управления байпасным клапаном, и создание устройств, реагирующих на начавшийся помпаж (сигнализаторы помпажа), которые подавали дискретный сигнал на полное открытие байпасного клапана.

Анализ критериев, используемых для распознавания помпажа, показал, что многие из них основаны на детекторах скорости изменения сигналов датчиков газодинамических параметров компрессора. Например, подобным критерием является снижение сигналов расхода или давления нагнетания со скоростями выше выбранных пороговых значений, но у одного и того же компрессора в разных технологических ситуациях скорости изменения сигналов при помпаже могут существенно отличаться от значений, полученных во время помпажных испытаний. В современных публикациях указывается на недостаточный уровень надежности выявления помпажа у сегодняшнего поколения противопомпажных систем, основанных на



в этом методе [2].

В этой связи, актуальным является создание устройств, реагирующих на вращающийся срыв, непосредственно предшествующий помпажу в центробежных компрессорах. Вращающийся срыв возникает при снижении расхода через компрессор, когда углы натекания потока на лопатки возрастают настолько, что происходит отрыв пограничного слоя и образуются зоны срыва. Зоны срыва захватывают только часть лопаток и перемещаются в сторону вращения рабочего колеса, несколько отставая от него, в отличие от помпажа, при котором колебаниям напора и расхода подвержена вся проточная часть и сеть.

Сложность диагностики заключается в том, что сигналы вращающегося срыва, характеризующие данный вид газодинамической неустойчивости: изменение давления, расхода, вибрации, осевого положения ротора, тока главного электродвигателя и др., имеют очень маленькие значения и при усилении этих сигналов они теряются в шумах и помехах, природа которых имеет как электрический, так и газодинамический характер. Вот для выделения сигналов вращающегося срыва из шумов и используются методы теории вероятности.

Проблема эффективности и надежности диагностики помпажа и предпомпажного состояния турбокомпрессоров была теоретически и экспериментально решена в Санкт-Петербургском политехническом университете профессором Измайловым Р.А. [3] и его учениками более двадцати лет назад за счет применения способов распознавания помпажа, основанных на непрерывной групповой статистической обработке сигналов с использованием математического аппарата теории вероятности.

Первоначально Измайлов Р.А. использовал вычисление корреляционной функции сигналов с датчиков параметров ЦКУ, а точнее автокорреляцию: сравнение текущего события с предыдущим, а в последующем вейвлет-преобразования и др. [4]. Его ученики в Казани использовали вычисления дисперсии и математического ожидания сигналов с датчиков параметров, которые позволяют выявить повторяющиеся события в шумах, а в дальнейшем использовали и вычисления ковариации, при которой происходит сравнение двух или более, взаимосвязанных сигналов, с различных датчиков параметров. Путь к этому пролегал через большой объем экспериментальных работ.

Начиная с 1996 г., практически все центробежные компрессоры, изготовленные в ОАО "Казанькомпрессормаш", подвергались помпажным испытаниям на воздухе, а затем и на месте эксплуатации на рабочем газе с записью сигналов, предшествующих помпажу, на специальном переносном комплек-

се оборудования. Записанные в цифровой форме, сигналы позволили анализировать их и подвергать различным методам математической обработки. В результате поисковых теоретических работ было выявлено, что наилучшие результаты для обнаружения вращающегося срыва и помпажа дает анализ дисперсии сигналов, математического ожидания (среднего) и ковариации. В настоящее время в сигнализаторах помпажа АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа» используются два способа распознавания предпомпажного состояния (вращающегося срыва).

Первый способ основан на непрерывном вычислении в реальном масштабе времени среднего значения ( $\bar{x}$ ), дисперсии ( $\sigma_x^2$ ) и отношение дисперсии к квадрату среднего значения ( $\sigma_{np}^2$ ) сигнала перепада давления на расходомерном устройстве, которые могут быть вычислены по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{np}^2 = \frac{\sigma_x^2}{(\bar{x})^2} \quad (3)$$

В качестве критерия помпажа принимается превышение величины  $\sigma_{np}^2$  выбранного порогового значения ( $\sigma_{nop}^2$ ):

$$\sigma_{np}^2 \geq \sigma_{nop}^2 \quad (4)$$

Информативность дисперсионного параметра для распознавания помпажа показана на рис.1 на примере данных помпажных испытаний компрессора ЗГЦ2-38/9,5-28. Способ показал высокую эффективность и помехоустойчивость в условиях эксплуатации на всех типах центробежных компрессоров и защищен патентами РФ [5], [6].

Второй способ основан на анализе в реальном масштабе времени ковариации сигналов двух режимных параметров, имеющих коррелированные тенденции в предпомпажный и помпажный период.

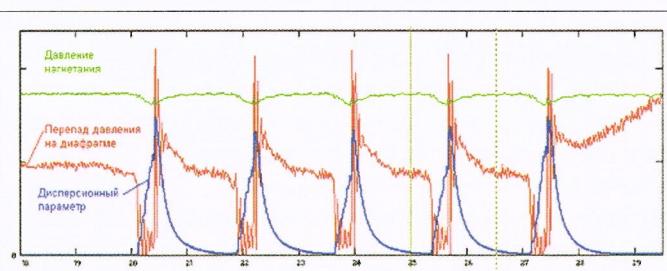


Рис. 1. Информативность дисперсионного параметра на примере данных помпажных испытаний компрессора ЗГЦ2-38/9,5-28



По таким парам параметров  $(x, y)$  вычисляются их средние значения  $(\bar{x}, \bar{y})$  и ковариация  $\text{cov}\{x, y\}$ :

$$\text{cov}\{x, y\} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2. \quad (5)$$

В качестве величины, характеризующей степень неустойчивости процесса компримирования, используется параметр приведенной ковариации  $\text{cov}_{np}$ :

$$\text{cov}_{np} = \frac{\text{cov}\{x, y\}}{x \cdot y}. \quad (6)$$

Критерием начала помпажа является превышение величины  $\text{cov}_{np}$ , выбранного порогового значения ( $\text{cov}_{np}$ ):

$$\text{cov}_{np} \geq \text{cov}_{np}. \quad (7)$$

На практике для распознавания помпажа используются пары сигналов следующих параметров:

- перепад давления на расходомерном устройстве – давление нагнетания;
- перепад давления на расходомерном устройстве – ток электропривода;
- перепад давления на расходомерном устройстве – осевое смещение ротора;
- давление нагнетания – ток электропривода.

Результаты помпажных испытаний нагнетателя Н-133-21-01 показаны на рис. 2, где проявляется высокая эффективность ковариационного метода распознавания границы помпажа. Данный пример также иллюстрирует высокую помехоустойчивость способа в условиях нестационарного сигнала перепада давления на расходомерном устройстве, где традиционные способы выявления помпажа не дают положительного результата.

Способ защищен патентом РФ [7]. Эффективность его применения для выявления помпажа подтверждена в условиях эксплуатации для всех типов центробежных компрессоров.

При практической реализации выяснилось, что для вычисления среднего значения, дисперсии и ковариации сигналов, с использованием приведенных выше формул (1) - (6), требуется большое количество вы-

числительных операций и непозволительно большое время. Авторами было создано специальное математическое обеспечение, позволяющее оптимизировать вычисление статистических функций в реальном масштабе времени и сократить время расчетов, в результате время выдачи результатов составляет не более 0,2 секунд. Сигнализатор границы помпажа реализовывается на большинстве современных программируемых логических контроллерах, применяемых для систем управления турбокомпрессорами.

Выполненные в АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» теоретические и экспериментальные работы позволили создать промышленные устройства и с 2001 г. почти все центробежные компрессорные установки, изготовленные в ОАО «Казанькомпрессормаш», снабжены сигнализаторами помпажа на основе статистической обработки сигналов. Сигнализаторы выполняются как на отдельных устройствах, так и в виде специального программного блока, входящего в прикладное программное обеспечение контроллера системы управления. Надежность распознавания обеспечивается тем, что помпаж диагностируется одновременно по четырем алгоритмам – одному дисперсионному и трем ковариационным для различных пар сигналов.

Особое значение проблема диагностики предпомпажного состояния (вращающегося срыва) имеет для компрессоров с электромагнитными подшипниками, у которых явления газодинамической неустойчивости не всегда сопровождаются существенными пульсациями давления и расхода. Это сильно затрудняет проведение помпажного тестирования, определение границы помпажа и настройку контура антипомпажного регулирования традиционными методами. Применение методов диагностирования газодинамической неустойчивости, основанных на анализе значения ковариации режимных параметров, позволяет корректно определить границу помпажа любого типа компрессоров.

Информативность ковариационного параметра для диагностики вращающегося срыва проиллюстрирована рисунками 3 и 4 на примере данных, полученных при помпажных испытаниях нагнетателей НЦ-16/76-1,44 (ГПА «Волга») и НЦ-12/56-1,44 (ГПА-12 «Урал»). В приведенных примерах компрессоры снабжены электромагнитными подшипниками, вследствие чего, явления газодинамической неустойчивости не сопровождались характерными пульсациями давления нагнетания и расхода.

К основным преимуществам критерии распознавания помпажа, основанных на обработке сигналов с помощью статистических функций, следует отнести:

- высокую надежность и эффективность определения границы помпажа;

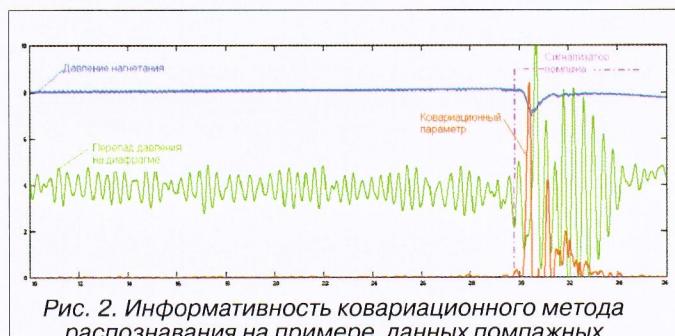
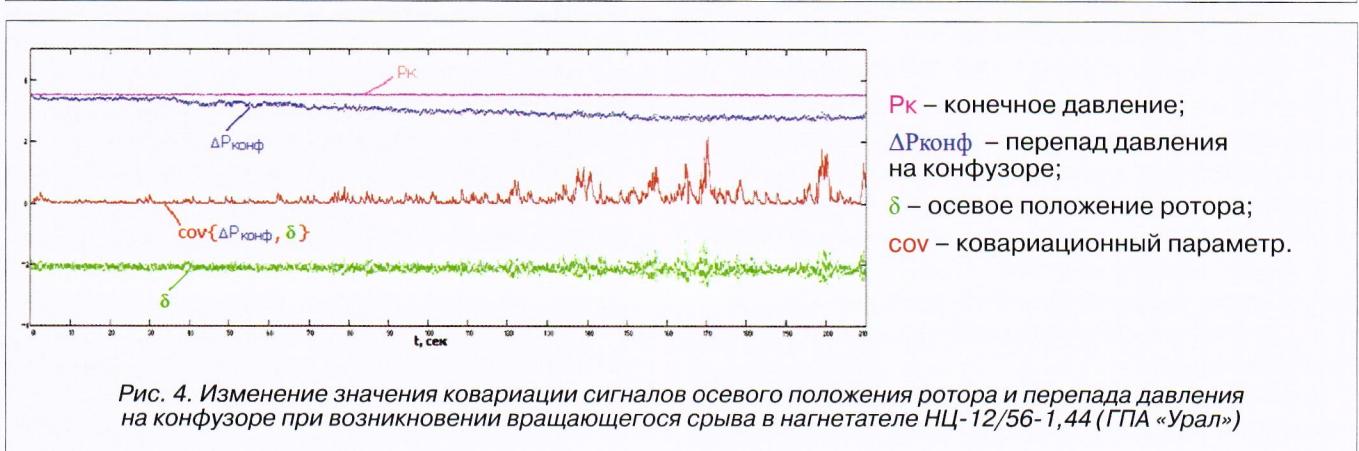
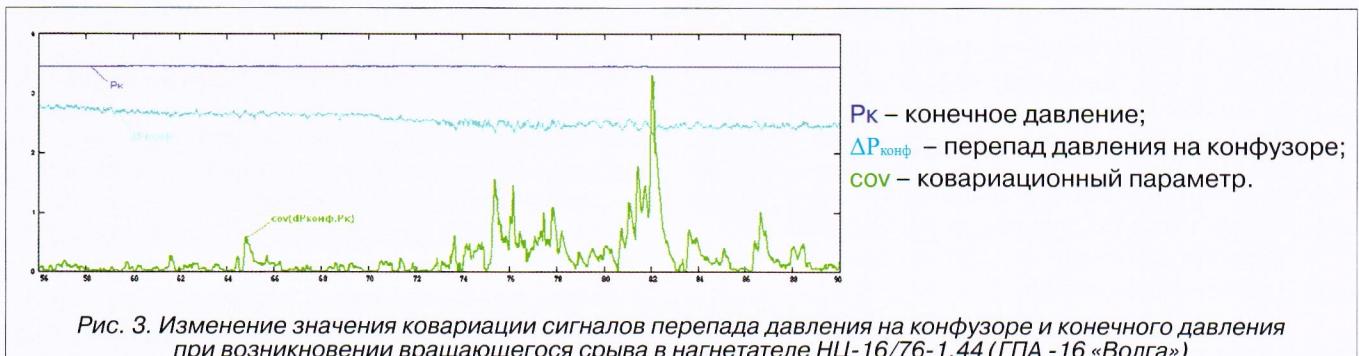


Рис. 2. Информативность ковариационного метода распознавания на примере данных помпажных испытаний нагнетателя Н-133-21-01

- устойчивость к шумам и помехам;
- отсутствие ложных срабатываний;
- возможность практической реализации обработки сигналов и проведения вычислений в реальном масштабе времени на современных микропроцессорных контроллерах.

Диагностика явлений газодинамической неустойчивости в центробежных компрессорах с помощью

статистических способов обработки сигналов датчиков позволяет корректно и безопасно проводить помпажные испытания и настройку систем антипомпажной защиты и регулирования без ввода компрессора в опасные режимы «жесткого» помпажа, что подтверждено многолетним опытом эксплуатации центробежных компрессоров, выпускаемых ОАО «Казанькомпрессормаш».



### Список литературы

- Хисамеев И.Г., Максимов В.А., Баткис Г.С., Гузельбаев Я.З. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров. Учебное пособие. Изд.2-е, испр. И дополн.-Казань:Изд-во «ФЭН», 2012.- 671 с.
- Старосельский С. Встроенная защита от помпажа и контроля производительности центробежных и осевых компрессоров при помощи измерения вибрации // Компрессорная техника и пневматика, №2, 2013. – С.18-23.
- Измайлова Р.А. и др. Диагностика помпажа центробежного компрессора на основе анализа нестационарных процессов в проточной части / Проектирование и исследование компрессорных машин: Сб.научных трудов под ред. д.т.н. И.Г. Хисамеева, вып. 4 / АО «НИИтурбокомпрессор». Казань, 1999. – С.93-99.
- Измайлова Р.А., Лебедев А.А. Применение вейвлет-преобразования для исследования сигналов нестацио-
- нарного процесса центробежного компрессора / Труды XIV Международной научно-технической конференции по компрессорной технике, том II / ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа». Казань: изд. «Слово», 2007. – С.107 113.
- Гузельбаев Я.З., Фафурин А.В., Хисамеев И.Г., Хавкин А.Л. Способ диагностики помпажа турбокомпрессора и система для его реализации / Патент на изобретение РФ № 2172433, 20.08.2001.
- Гузельбаев Я.З., Хавкин А.Л. Способ распознавания помпажа турбокомпрессора и система для его реализации / Патент на изобретение РФ № 2247868, 10.03.2005.
- Гузельбаев Я.З., Хавкин А.Л. Способ диагностики помпажа турбокомпрессора и система для его реализации / Патент на изобретение РФ № 2247869, 10.03.2005.

