**Нгуен Минь Хай. Информативные критерии для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.06 Санкт-Петербург, 2007 190 с. РГБ ОД, 61:07-5/2118**

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

/ L// На правах рукописи

Нгуен Минь Хай

**ИНФОРМАТИВНЫЕ КРИТЕРИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДПОМПАЖНОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА**

Специальность 05.04.06 - «Вакуумная, компрессорная техника и

пневмосистемы» Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Измайлов Р. А.

Санкт-Петербург 2007

-2-ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение -5 -

*Глава 1.* Анализ состояния проблемы. Цель и постановка задач исследования.- 9 -

1. Состояние исследования нестационарных процессов в центробежном компрессоре. Помпаж и вращающийся срыв - 9 -
2. Классификация нестационарных процессов в центробежном компрессоре -15 -
3. Виды вращающегося срыва в центробежном компрессоре -19 -

1. 4. Актуальность выбранной темы - 23 -

1.5. Цели и постановка задач исследования - 29 -

*Глава 2.* Объект и предмет исследования - 30 -

*Глава 3.* Методика экспериментального исследования - 33 -

1. Выбор метода экспериментального исследования - 33 -
2. Автоматизированная система для исследования нестационарных аэродинамических процессов - 36 -
3. Выбор способа обнаружения предпомпажного состояния и определения информативных признаков - 39 -

*Глава 4.* Методика обработки сигналов - 45 -

1. Способы представления сигналов пульсаций давления - 45 -
2. Способы обработки сигналов для обнаружения скрытых периодичностей - 49 -
3. Сингулярный спектральный анализ - 58 -
4. Базовый алгоритм ССА - 58 -
5. Рекомендации для обработки нестационарных сигналов - 67 -
6. Корреляционные функции - 70 -
7. Сравнение способов определения периода сигналов - 78 -
8. Алгоритм для автоматического обнаружения скрытых периодичностей пульсаций давления в центробежном компрессоре - 83 -
9. Плотность вероятности сигналов - 93 -

-3-

1. Относительный размах пульсаций давления - 95 -
2. Определение числа срывных зон и скорости их перемещения при вращающемся срыве - 97 -

*Глава 5.* Обработка цифровых записей и анализ результатов -106 -

1. Общие сведения о цифровых записях и их обработке -106 -
2. Результаты обработки испытаний ступени KZ -113 -
3. Результаты обработки испытаний ступени NC -124 -
4. Результаты обработки испытаний ступени RB -138 -
5. Анализ результатов обработки -154 -

*Глава 6.* Информативные критерии для обнаружения предпомпажного состояния и антипомпажный алгоритм для центробежного компрессора...-161 -

1. Информативные критерии для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора -161 -
2. Антипомпажный алгоритм для центробежного компрессора -167 -
3. Результаты применения антипомпажного алгоритма для ступеней KZ, NC,RB -172-

6.4. Рекомендации для построения антипомпажной системы -174 -

Заключение „ -175 -

Список использованной литературы -178 -

-4-**УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ**

А - относительный размах пульсаций давления;

А - средний относительный размах пульсаций давления в данном сечении;

Az - средний относительный размах пульсаций давления за z кадров; D - диаметр характерного сечения проточной части; D - относительный диаметр, D = D/D2;

f - частота процесса, Гц;

і - угол атаки потока, индекс;

Lmax(2) - второй (по величине) локальный максимум автокорреляционной

функции; Ми - число Маха; р - давление (статическое); р(х) - плотность вероятности; Rs - уровень устойчивости низкочастотных составляющих пульсаций

давления; S - спектральная плотность мощности; Т - период процесса;

U2 - окружная скорость на периферии рабочего колеса; z - число лопаток, число зон срыва, число кадров для обработки; *а2 -* угол потока на выходе из рабочего колеса; п\* - политропный коэффициент полезного действия по полным параметрам;

*X -* сингулярное число;

Ф - условный коэффициент расхода;

Фопт - условный коэффициент расхода оптимального режима;

*\\f\** - политропный коэффициент напора по полным параметрам;

**Сокращения**

АКФ - автокорреляционная функция;

АЦП - аналого-цифровой преобразователь;

БЛД - безлопаточный диффузор;

ККФ - кросс-корреляционная функция;

КПД - коэффициент полезного действия;

ЛД - лопаточный диффузор;

ОНА - обратно-направляющий аппарат;

РК - рабочее колесо;

ССА - сингулярный спектральный анализ;

ФНЧ - фильтр низких частот.

Остальные условные обозначения поясняются в тексте.

**-5-**

Введение

**Актуальность темы исследования.** Центробежные компрессоры используются во многих отраслях промышленности: в энергетике, металлургии, машиностроении, газовой, нефтяной, горнодобывающей отрасли и др. Центробежный компрессор большой мощности является ключевой энергетической установкой компрессорных станций магистрального газопровода, газо-, нефтеперерабатывающих заводов, промышленных холодильных установок, систем кондиционирования, вентиляции и многих других систем и линий производства. Выход из строя компрессора приводит к большим материальным убыткам. Поэтому необходимо обеспечивать безопасную (устойчивую) работу при эксплуатации центробежного компрессора.

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения единичной мощности, производительности, окружной скорости и давления нагнетания промышленных центробежных компрессоров вместе с тенденцией снижения металлоемкости их конструкции. Это приводит к повышению уровня динамических нагрузок, а также к опасности разрушения высоконагруженных элементов конструкции компрессора и компрессорной установки в целом, как правило, из-за нестационарных процессов. Поэтому существует необходимость в исследованиях нестационарных процессов центробежного компрессора с целью обеспечения его эффективной, устойчивой и надёжной работы.

Помпаж - глобальная (полная) потеря устойчивости - недопустимое явление для центробежного компрессора. Защита компрессора от помпажа должна быть обеспечена при его эксплуатации. Существующие алгоритмы защиты центробежного компрессора от помпажа имеют недостатки, из-за которых защищённость от помпажа машины не может быть надёжно обеспечена. Поэтому разработка информативных критериев для построения робастного алгоритма защиты центробежного компрессора от помпажа -актуальная задача.

**-6-**

**Цели и задачи исследования.** Настоящая диссертационная работа является продолжением цикла работ по исследованию нестационарных процессов в центробежном компрессоре, выполняемых на кафедре "Компрессорная, вакуумная и холодильная техника" (КВХТ) СПбГПУ под руководством профессора, д.т.н. Р.А. Измайлова. *Основными целями* данной работы является *разработка информативных критериев* для своевременного обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора и *построение антипомпажного алгоритма,* основанного на этих критериях.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие *задачи:*

* проанализировать способы обработки нестационарных сигналов;
* выбрать способы и разработать алгоритм для автоматического обнаружения периодических составляющих нестационарных сигналов;
* проанализировать имеющиеся данные экспериментального исследования нестационарных процессов с измерением быстроменяющихся величин в типовых ступенях центробежного компрессора;
* обработать имеющиеся экспериментальные данные;
* проанализировать результаты обработки;
* разработать информативные критерии для своевременного обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора;
* разработать алгоритм антипомпажной защиты на основании сформулированных информативных критериев.

Объектом исследования являются модельные ступени промышленных нагнетателей природного газа.

Предметом исследования в данной работе являются пульсации статического давления в неподвижных элементах проточной части центробежного компрессора.

Методы исследования **и** используемые инструментальные средства. Для экспериментального исследования нестационарных процессов в центробежном компрессоре используются разработанная под руководством

-7-проф. Р. А. Измайлова методика и информационно-измерительный комплекс

кафедры КВХТ СПбГПУ. Для обработки сигналов применяются *сингулярный*

*спектральный анализ, кратковременный корреляционный анализ и*

*фильтрация.* Разработанная методика обработки сигналов реализована

автором в платформе Matlab 6.5.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика обработки сигналов (способы обработки сигналов с целью обнаружения скрытых периодичностей, сингулярный спектральный анализ, кратковременный корреляционный анализ, разработанный автором алгоритм для автоматического обнаружения скрытых периодичностей и относительный размах пульсаций давления).
2. Методика определения числа срывных зон и скорости их перемещения при вращающемся срыве в центробежном компрессоре.
3. Результаты обработки цифровых записей испытания ступеней.
4. Информативные критерии для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора.
5. Антипомпажный алгоритм, построенный на основании разработанных критериев.

**Научная новизна.** В данной работе получены следующие результаты:

1. Разработана методика обработки сигналов с целью обнаружения скрытых периодичностей. Усовершенствована методика определения числа срывных зон и скорости их перемещения при вращающемся срыве в центробежном компрессоре.
2. Разработаны критерии для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора.
3. Предложен новый алгоритм защиты центробежного компрессора от помпажа.

**Практическая значимость** работы состоит в следующем: 1. На основе полученных результатов исследования можно построить робастную систему защиты центробежного компрессора от помпажа, позволяющую расширить зону эффективной работы и повысить надёжность установки.

**-8-**

1. Разработанная методика обработки сигналов может быть использована не только для пульсаций давления в центробежном компрессоре, но и для других параметров, характеризующих нестационарные процессы.
2. Разработанный подход к построению информативных критериев можно применять для широкого круга задач диагностики турбомашин (например, для диагностики напряжённо-деформационного состояния элементов и узлов конструкции, вибродиагностики турбомашин и др.).

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается а) использованием результатов испытаний модельных ступеней, применённых при проектировании натурных нагнетателей природного газа, выпускаемых промышленностью; б) использованием требуемой частоты дискретизации при записи пульсаций давления, выполняемой с помощью современной информационно-измерительной системы; в) дублированием измерений быстроменяющихся величин; г) сопоставлением полученных результатов с выполненными ранее исследованиями по измерению параметров нестационарного потока; д) использованием современных робастных алгоритмов выделения скрытых периодичностей.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертации докладывались на научной конференции студентов и аспирантов "XXXIV Неделя науки СПбГПУ" (СПб, 28 ноября - 3 декабря 2005 г.), "XXXV Неделя науки СПбГПУ" (СПб, 20 - 25 ноября 2006 г.) и конференции "Молодые учёные - промышленности Северо-Западного региона" в рамках политехнического симпозиума 2006 г (СПб, декабрь 2006 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы четыре печатные работы, две из них в журнале "Компрессорная техника и пневматика" [31,32].

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы из 167 наименований. Материал, изложен на 190 страницах машинописного текста и содержит 131 рисунок и 5таблиц.

**Заключение**

В ходе работы над диссертацией были:

* проанализированы способы обработки нестационарных сигналов;
* выбраны сингулярный спектральный анализ и текущий корреляционный анализ для построения алгоритма автоматического обнаружения периодических составляющих нестационарных сигналов;
* проанализированы имеющиеся данные выполненного в широком диапазоне изменения режимных параметров экспериментального исследования нестационарных процессов в типовых ступенях центробежного компрессора;
* обработаны имеющиеся экспериментальные данные;
* проанализированы результаты обработки;
* разработаны информативные критерии для своевременного обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора;
* предложен новый алгоритм антипомпажной защиты на основании разработанных информативных критериев.

На основании проведённого исследования можно сделать *следующие выводы:*

1. Разработан новый алгоритм, основанный на сингулярном спектральном анализе и кратковременной автокорреляционной функции, для автоматического обнаружения периодических составляющих нестационарных пульсаций давления. Применимость и надежность разработанного алгоритма для нестационарных сигналов проверялись на большом количестве результатов испытаний различных модельных ступеней нагнетателей природного газа при разных числах Маха и расходах (были обработаны около тысячи цифровых записей).
2. Низкочастотные составляющие пульсаций давления присутствуют на всех режимах работы, причём эти периодичности наименее устойчивы на оптимальном режиме. При уменьшении расхода от оптимального

-176-режима низкочастотные периодичности пульсаций давления

становятся устойчивыми. При интенсивном вращающемся срыве

низкочастотные периодичности существуют не только в проточной

части, но и распространяются вплоть до входа в компрессор.

1. Усовершенствована методика определения числа срывных зон и скорости их перемещения при вращающемся срыве, позволяющая автоматически определить эти параметры при любой форме вращающегося срыва.
2. Сформулированы информативные критерии для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора. Первый критерий - уровень устойчивости периодической составляющей пульсаций давления в диффузоре *(Rs).* Второй критерий - порог относительного размаха пульсаций давления на входе в диффузор центробежной ступени *(А).* Получены количественные оценки для испытанных ступеней: *А =* 0,015 соответствует началу предсрыва или слабого срыва, и *А* = 0,02 - началу интенсивного срыва. С помощью полученных критериев можно разделить предпомпажную область на предсрыв (1), слабый срыв (2) и интенсивный срыв (3). Такая детализация позволяет избежать ложного срабатывания (на режимах больших расходов) и преждевременного срабатывания (при неинтенсивном срыве) системы антипомпажного регулирования.
3. На основании полученных критериев разработан новый алгоритм для антипомпажного регулирования, согласно которому антипомпажная система готовится к срабатыванию, когда в проточной части центробежного компрессора возникает предсрыв или слабый срыв, и срабатывает при появлении интенсивного срыва. Применимость разработанного алгоритма проверялась на длинных записях пульсаций давления в испытанных ступенях при различных условиях и режимах работы. Результаты применения разработанного алгоритма показывают, что защита центробежного компрессора от помпажа

-177-

может быть обеспечена признаковым способом с применением

сформулированных критериев. Кроме того, применение данного

алгоритма позволяет расширять зону возможной работы с высоким

*КПД* благодаря тому, что антипомпажная система срабатывает до

наступления помпажа и только при появлении реальной опасности для

работы компрессора.

Таким образом, можно заключить, что поставленные задачи в данной

работе выполнены, а цели исследования - достигнуты. Однако с позиций

исследования нестационарных процессов и практической реализации

разработанного метода для центробежных компрессоров остаются вопросы,

требующие дальнейшей разработки. К ним относятся:

1. Проблема определения места зарождения, направления и интенсивности распространения вращающегося срыва по тракту ступени, в том числе для многоступенчатых компрессоров.
2. Задача аппаратной реализации разработанного алгоритма с применением современных DSP-процессоров или соответствующих технологий.
3. Оптимизация алгоритма для обеспечения требуемого быстродействия применительно к системам реального времени.

**-178-**

**Список использованной литературы**

**1. Александров, Ф. И.** Разработка программного комплекса автоматического  
выделения и прогноза аддитивных компонент временных рядов в рамках  
подхода'Тусеница''-SSA: Дис.... канд. физ.-мат. наук/ Александров

Ф. И. - СПбГУ. - СПб., 2006. - 152 с.

1. Анализ сигналов пульсаций в модели ступени нагнетателя магистрального газопровода: Отчет о НИР / СПбГТУ; рук. Измайлов Р. А.; исполн. Акульшин Ю. Д. - СПб., 1996. - 38 с. - №306604/803-509.
2. Анализ теоретических и экспериментальных материалов о возникновении нестационарных явлений в проточной части на предпомпажных режимах: Отчет о НИР / СПбГТУ; рук. Измайлов Р. А.; исполн. Акульшин Ю. Д-СПб., 1995. - 42 с. - №306415/803-226.
3. **Баскаков,** СИ. Радиотехнические цепи и сигналы / Баскаков СИ. - М.: Высшая школа, 2000. - 464 с.
4. **Бендат,** Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Бендат Дж., Пирсол А; Пер. с англ. - М: Мир, 1974. - 464 с.
5. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Бендат Дж., Пирсол А; Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 540 с.
6. Бендат, Дж. Применения корреляционного и спектрального анализа / Бендат Дж., Пирсол А; Пер. с англ. - М: Мир, 1983. - 312 с.
7. **Бухарин, Н. Н.** Моделирование характеристик центробежных компрессоров / Бухарин Н. Н. - Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1983. - 214 с.
8. **Витязев, В. В.** Вейвлет-анализ временных рядов: учеб. пособие / Витязев В. В. - СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2001. - 58 с.
9. **Витязев, В. В.** Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов: учеб. пособие / Витязев В. В. - СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2001. - 48 с.
10. **Воеводин, В. В.** Матрицы и вычисления / Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. - М.: Наука, 1984. - 320 с.
11. **Воробьев, В. И.** Г. Теория и практика вейвлет-преобразования / Воробьев В. И., Грибунин В. Г. - ВУС, 1999. - 204 с.
12. **Галеркин, Ю. Б.** Модернизация нагнетателей ГПА установкой новой проточной части с безлопаточными диффузорами / Галеркин Ю. Б. [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. -1998. - №11. - с. 22-28.

-179-

1. **Галеркин, Ю. Б.** Новое поколение модельных ступеней с безлопаточными диффузорами для модернизации линейных нагнетателей природного газа / Галеркин, Ю. Б. [и др. ] // Труды пятого Международного симпозиума "Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования-1999". - СПб. -1999. - с.114-120.
2. **Галеркин, Ю. Б.** Методы исследования центробежных компрессорных машин / Галеркин 10. Б., Рекстин Ф. С. - Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1969. - 304 с.
3. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под. ред. Д. Л. Данилова, А. А. Жиглявского. - СПб: Пресском, 1997. - 307 с.
4. **Голянднна, Н. Э.** Метод «Гусеница»-88А: анализ временных рядов: учеб. пособие / Голяндина Н. Э. - СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2004. - 76 с.
5. **Голяндина, Н. Э.** Метод «Гусеница»-88А: прогноз временных рядов: учеб. пособие / Голяндина Н. Э. - СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2004.-52 с.
6. **Горяинов, В. Т.** Статистическая радиотехника: Примеры и задачи / Горяинов В. Т., Журавлев А. Г. - 2-е изд. - М.: Сов. Радио, 1980. - 544 с.
7. **Грейтцер, Е. М.** Явление срыва потока в осевых компрессорах (обзор) / Грейтцер Е. М. // Тр. Амер. об-ва. инж.-мех. -1980. - №2. - с. 72-97.