

На правах рукописи

Лебедев Александр Анатольевич

**ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ  
КОМПРЕССОРЕ**

Специальность 05.04.06 – «Вакуумная, компрессорная техника и  
пневмосистемы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена на кафедре “Компрессорная, вакуумная и холодильная техника ” Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Измайлов Рудольф Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Жарковский Александр Аркадьевич

кандидат технических наук, доцент

Крутиков Тимофей Евгеньевич

Ведущая организация: ЗАО «РЭП Холдинг», Санкт-Петербург, базовое предприятие ЗАО «Невский завод», Санкт-Петербург

Защита состоится “\_\_” \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” (по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, ауд. \_\_\_\_\_ главного здания).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан “\_\_” \_\_\_\_\_ 2009 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.229.09

д.т.н., профессор

Хрусталёв Б. С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Центробежные компрессоры являются неотъемлемой частью современных производств в таких отраслях промышленности как газотранспортная, нефтеперерабатывающая, металлургическая, машиностроительная, горнодобывающая, а также в электро- и теплоэнергетике. Перебои в работе или выход из строя компрессора ведут большим материальным убыткам.

По существующим в настоящее время данным явление вращающегося срыва проявляется перед попаданием компрессора в помпаж. Помпаж – полная потеря устойчивости, недопустимое явление для центробежного компрессора. При вращающемся срыве наблюдаются периодические пульсации давления, выявления которые можно определить предпомпажное состояние компрессора. Применяемые сейчас способы защиты центробежного компрессора от помпажа имеют недостатки, не позволяющие исключить помпаж. Поэтому разработка принципов и выбор информативных условий для построения надежного алгоритма защиты центробежного компрессора от помпажа, на основе выявления периодических явлений – актуальная задача.

**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 *определение информационных условий* при применении данного метода для своевременного обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора и *принципов построения антипомпажного алгоритма*, основанного на этих условиях.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать способы анализа нестационарных сигналов;

- выбрать способы и сформировать принципы построения алгоритмов на их основе для обнаружения периодической составляющей в нестационарном сигнале, характерной для вращающегося срыва;
- проанализировать имеющиеся результаты экспериментального исследования нестационарных процессов с измерением быстроменяющихся величин в типовых ступенях центробежного компрессора;
- обработать имеющиеся экспериментальные данные;
- проанализировать результаты обработки;
- разработать принципы формирования информационных условий и применить их для своевременного обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора;
- разработать алгоритм антипомпажной защиты на основании данного метода.

**Объектом исследования** являются модельные ступени промышленных нагнетателей природного газа.

**Предметом исследования** в данной работе являются нестационарные процессы и порождаемые ими пульсации статического давления в неподвижных элементах проточной части центробежного компрессора.

**Методы исследования и используемые инструментальные средства.**

Для анализа используются результаты экспериментального исследования нестационарных процессов в центробежном компрессоре, выполненные с применением разработанной под руководством проф. Р. А. Измайлова методики и информационно-измерительного комплекса кафедры КВХТ СПбГПУ. Для обработки сигналов применяются *вейвлет - разложение, спектральный анализ, кратковременный корреляционный анализ*. Разработанная методика обработки сигналов реализована автором на платформе Matlab 7.0.1.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика обработки сигналов (способы обработки сигналов с целью обнаружения скрытых периодичностей, вейвлет-разложение, на его основе

разработанный автором алгоритм для обнаружения скрытых периодичностей).

2. Результаты обработки цифровых записей испытания ступеней.
3. Информационные условия для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора.
4. Антипомпажный алгоритм, построенный на основании данной методики.

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

1. Разработана методика обработки сигналов с целью обнаружения скрытых периодичностей с применением вейвлет-анализа.
2. Разработан алгоритм, выявляющий периодические составляющие в нестационарном сигнале.
3. Предложен алгоритм для параллельного выявления периодичностей.
4. Выявлена возможность работы алгоритма с короткими реализациями и применимость его для переходных режимов.
5. Предложено использование значений диапазона периодов в качестве информационного критерия.
6. Предложены информационные условия для определения границ интервалов на основе дополнительных критериев.
7. Предложена схема системы защиты центробежного компрессора от помпажа.

**Практическая значимость** работы состоит в следующем:

1. На основе полученных результатов исследования возможно создание автоматической быстродействующей системы защиты центробежного компрессора от помпажа, позволяющей расширить зону эффективной работы и повысить надёжность установки.
2. Применённая методика анализа сигналов пригодна не только для анализа пульсаций давления в центробежном компрессоре, но и для других нестационарных процессов.
3. Данная методика позволяет производить самодиагностику системы с целью обнаружения неисправности канала измерения.

4. Анализ сигналов позволяет обнаружить неисправности компрессора как механической системы.
5. Разработанная методика применима для использования на уровне проектирования компрессора как системы и доводки компрессора.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается:

- а) использованием результатов испытаний модельных ступеней, применённых при проектировании натуральных нагнетателей природного газа.
- 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 высокоскоростных и надежных алгоритмов выделения скрытых периодичностей.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертации докладывались на научных конференциях “XXXIII Неделя науки СПбГПУ” (СПб, 28 ноября – 3 декабря 2005 г.), “XXXIV Неделя науки СПбГПУ” (СПб, 20 - 25 ноября 2006 г.) и “Международная научно техническая конференция по компрессорной технике” Казань 2007 г. (Казань, май 2007 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы пять печатных работ, список которых приведён в конце автореферата.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, восьми глав с заключением, списком использованной литературы из 146 наименований. Материал изложен на 300 страницах машинописного текста и содержит 367 рисунков и 8 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели задачи исследования, показана научная новизна и практическая значи-

мость полученных результатов, изложены основные положения работы, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена описанию современного состояния проблемы, постановке задачи и цели исследования. Содержит обзор литературы по вопросам аэродинамики нестационарных процессов в проточной части центробежного компрессора и помпажа, обосновывающей актуальность работы, представляющей цель и задачи исследования. Для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора выбран признаковый способ. Применяемый способ основывается на информации о состоянии потока в предпомпажной области, в которой последовательно существуют предсрыв и срыв. Конечными характеристиками этого процесса являются критические значения информационных условий, позволяющих прогнозировать возникновение помпажа.

**Во второй главе** приведено описание объектов исследования трех модельных ступеней промышленных нагнетателей природного газа, данные о ранее проведенных на кафедре КВХТ экспериментах, использованных при выполнении работ.

Для модельной ступени “KZ” прототипом являлась первая ступень нагнетателя 395-21-1 ПО “Невский завод”, для ступени “NC” - первая ступень нагнетателя НЦ-16/76-1,44, для ступени “RB” - базовая ступень кафедры КВХТ СПбГПУ (ЛПИ). Ступени KZ и NC имеют лопаточный диффузор (ЛД), а RB - безлопаточный диффузор (БЛД). Основные отличия для разных серий испытаний ступеней заключались в различных местах установки датчиков давления, и частотах вращения, но это существенно не изменило средних значений чисел Маха. Рабочая среда - воздух, всасывание из атмосферы через фильтрационную камеру. Уровни эквивалентных окружных скоростей соответствуют уровню  $u_2$  нагнетателей природного газа (до 266м/с).

Предметом исследования являются пульсации статического давления в неподвижных элементах проточной части центробежной ступени в характерном диапазоне режимных параметров.

**Третья глава** посвящена методике экспериментального исследования. Рассматривается автоматизированная система для исследования нестационарных аэродинамических процессов, которая была использована для получения информации, разработанная под руководством Р. А. Измайлова. Для сравнения нестационарного и стационарного эксперимента приведено описание “традиционного” аэродинамического эксперимента при испытаниях, выполняемых группой под руководством проф. Ю. Б. Галёркина. На установке для изменения значений расхода применялась задвижка в выходном патрубке. Измерительные приборы, использованные при испытаниях, соответствовали общепринятым требованиям по допустимому уровню погрешности. Для измерения пульсаций давления были использованы малоинерционные датчики давления. Датчики  $p_1$  и  $p_2$  расположены на участке безлопаточного диффузора перед входом в диффузор, а датчики  $p_3$  и  $p_4$  - на выходе из диффузора. В сериях испытаний KZ датчики  $p_5$  и  $p_6$  расположены на стенках поворотного колена ступени. В сериях испытаний NC расположение датчика  $p_5$  как для KZ. В сериях испытаний RB датчики  $p_5$  и  $p_6$  установлены соответственно в нагнетательном и всасывающем патрубках.

Многолетние исследования на кафедре KBХТ показали, что одним из основных признаков вращающегося срыва является регулярное появление устойчивых низкочастотных (определенного частотного диапазона) периодических составляющих пульсаций давления. При предсрывном состоянии эти периодические составляющие появляются менее регулярно, чем при вращающемся срыве, но более регулярно, чем при оптимальном режиме или при работе центробежного компрессора в области максимального расхода. Кроме того, интенсивность пульсаций давления за рабочим колесом (РК) в предпомпажной области превышает существующую при работе компрессора в других областях характеристики «напор-расход». В итоге можно выделить следующие *информативные признаки* для данной работы: *основной - факт существования устойчивых низкочастотных периодичностей* и *дополнительный уровень интенсивности пульсаций давления* на входе и выходе из диффузора центробежного компрессора.



**В четвертой главе** рассмотрена методика обработки сигналов: 1) способы выявления скрытых периодичностей нестационарных сигналов; 2) вейвлет-анализ; 3) анализ периодограммным методом; 4) корреляционные функции; 5) процедура обработки данных комбинированным методом обнаружения скрытых периодичностей.

К алгоритму, используемому в антипомпажной системе центробежного компрессора, предъявляются следующие требования: быстрое действие системы принятия решения и его исполнения, соизмеримое с временем возникновения катастрофических последствий; однозначность, или надежность, т.е., результат выполнения алгоритма должен дать однозначное решение для последующего шага в работе системы управления и сбой в его работе не должны произойти в процессе обработки. Неопределенность недопустима; необходимо обеспечить достоверность и требуемую точность определения выходных параметров.

Большое количество способов обработки сигналов с целью выявления скрытых периодичностей затрудняет выбор наиболее качественного. Выбор метода основывался на анализе информации о практическом применении фильтрации, периодограммного, сингулярного анализа, спектрального и корреляционного анализа, вейвлет-анализа.

Анализ перечисленных способов показывает, что *совместное последовательное применение сначала вейвлет-анализа, а затем на основании его периодограммного и корреляционного анализа* позволяет получить комбинированный алгоритм, отвечающий основным требованиям для обработки нестационарных сигналов давления с целью обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора.

Вейвлет-анализ может быть охарактеризован как альтернатива классическому взвешенному анализу Фурье. Базовыми функциями анализа Фурье являются синусы и косинусы или волны, помноженные на скользящее окно. Вместо разложения на синусы и косинусы этот вейвлет произвольно сдвигается и растягивается по временной оси. Таким образом, генерирующий (или материн-

ский) вейвлет образует другие вейвлеты, которые являются строительными блоками вейвлет-анализа.

Вейвлет разложение осуществляется по следующей формуле:

$$P_j(f) = \sum_{k \in Z} a_{j-1,k} \varphi_{j-1,k}(x) + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(x)$$

где  $\varphi(x)$  - масштабирующая функция,  $\psi(x)$ -базисная вейвлет - функция,  $a_{j-1,k}$  - коэффициенты аппроксимации (j-1)-го уровня разрешения,

$a_{j-1,k} = (f, \varphi_{j-1,k}) = \int f(x) \overline{\varphi_{j-1,k}(x)} dx$  и  $d_{j-1,k}$  - детализирующие коэффициенты,

$d_{j-1,k} = (f, \psi_{j-1,k}) = \int f(x) \overline{\psi_{j-1,k}(x)} dx$ .

Полученные наборы коэффициентов  $cA_1 = \{a_{j-1,k}\}$ ,  $cD_1 = \{d_{j-1,k}\}$  образуют при переходе на другие глубины разложения  $cA_N = \{a_{j-N,k}\}$  - коэффициенты аппроксимации разложения глубины N,  $cD_n = \{d_{j-n,k}\}$  - детализирующие коэффициенты разложения глубины  $m = 1, 2, \dots, N/ - 1, 2, \dots, N$ . Преимущество коэффициентов  $cA_N = \{a_{j-N,k}\}$  и  $cD_n = \{d_{j-n,k}\}$  заключается в том, что они несут еще и качественную информацию. А именно, коэффициенты  $cA_1$  описывают более грубое (сглаженное) приближение функции  $f(x)$  в пространстве  $V_{j-1}$ , а коэффициенты  $cD_1$  характеризуют колебания функции  $f(x)$  относительно  $P_{j-1}(f)$ . Второе преимущество набора коэффициентов  $cA_1$  и  $cD_1$  заключается в том, что данные  $cA_1$ , представляющие сглаженную функцию  $P_{j-1}(f)$ , можно еще раз разложить на еще более сглаженную часть  $P_{j-2}(f)$  и детализирующую часть  $P_{j-2}^w(f)$

В данной работе применялся биортогональный вейвлет, выбор формы которого определялся требуемыми результатами разложения и обеспечением симметрии и точной реконструкции сигналов одновременно.

Свойство ортогональности вейвлетов  $\varphi_{j,n}$  и  $\psi_{j,n}$  является не единственным хорошим свойством, во многих случаях требуется симметричность. Однако не существует базиса симметричных ортогональных вейвлетов с компактным носителем, кроме вейвлета Хаара. С этой целью были введены дополнительные

две пары функций  $\varphi(x)$ ,  $\psi(x)$  и  $\tilde{\varphi}(x)$ ,  $\tilde{\psi}(x)$ , разложение производится по одним функциям а восстановление по другим, но при этом на их свойства наложены ограничения.

Для вейвлет - преобразования используется многоуровневое одномерное вейвлет-разложение на основе биортогонального вейвлета bior3.5. В результате разложения получены аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты для сигнала. Искомый нестационарный сигнал находился на уровнях с 5 по 8 для разных типов записей. Уровни с 1 по 4 содержат информацию о более высокочастотных процессах и на них можно видеть следы за лопатками.

По результатам анализа аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов исследуемый нестационарный процесс проявлялся на аппроксимирующих коэффициентах на нескольких уровнях, и было решено оставить для анализа только сигнал с аппроксимирующими коэффициентами.

При необходимости возможна и реконструкция сигнала с корректировкой коэффициентов разложения на требуемом уровне, для этого надо выбрать принципы для изменения, эта операция необходима для удаления помех (в данной работе не рассматривалась).

Далее аппроксимирующие коэффициенты были подвергнуты анализу комбинированным методом на основе периодограмм - и корреляционного анализа. Периодограммный метода сводится к вычислению спектральной плотности мощности, его основой является быстрое преобразование Фурье.

Разработанный алгоритм состоит из следующих стадий: первая стадия - открытие файлов данных с сигналом и преобразование их в действительные значения пульсаций давления, вторая - формирование участка для обработки, третья - выделение аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов, четвертая - анализ с помощью метода периодограмм, пятая - анализ с помощью автокорреляционного анализа, шестая - анализ всех вариантов пар датчиков кросс-корреляционным анализом, седьмая - вывод графиков обработки для стадий с третьей по шестую. После обработки сигнала можно оценить полученные результаты в каждой стадии.

В пятой главе описаны основные сведения о режимах и полученных на них экспериментальных данных, приведены результаты обработки. Итоговое количество режимов составило для ступени KZ для 5 серий экспериментов 44 режима данных, для ступени NC для 4 серий экспериментов 45 режимов данных, для ступени RB для 5 серий экспериментов 73 режимов данных, общее количество режимов данных - 162. Сведения о режимах состоят из характеристики работы модельной ступени (рис.1), жирными маркерами обозначено место появления предсрыва и срыва, и кодировок записи сигналов по режимам.

Визуальные результаты обработки данных состоят из аппроксимирующих коэффициентов (рис.2), энергетического спектра (рис. 3) и автокорреляционных функций.

В шестой главе проводится анализ результатов обработки. На основании полученных результатов после обработки формулируется перечень достаточных информационных сведений для обнаружения предпомпажного состояния центробежного компрессора, в качестве основного выбрана граница существования периода и временной диапазон для решения о его устойчивости, дополнительного - размах пульсаций и временной диапазон.

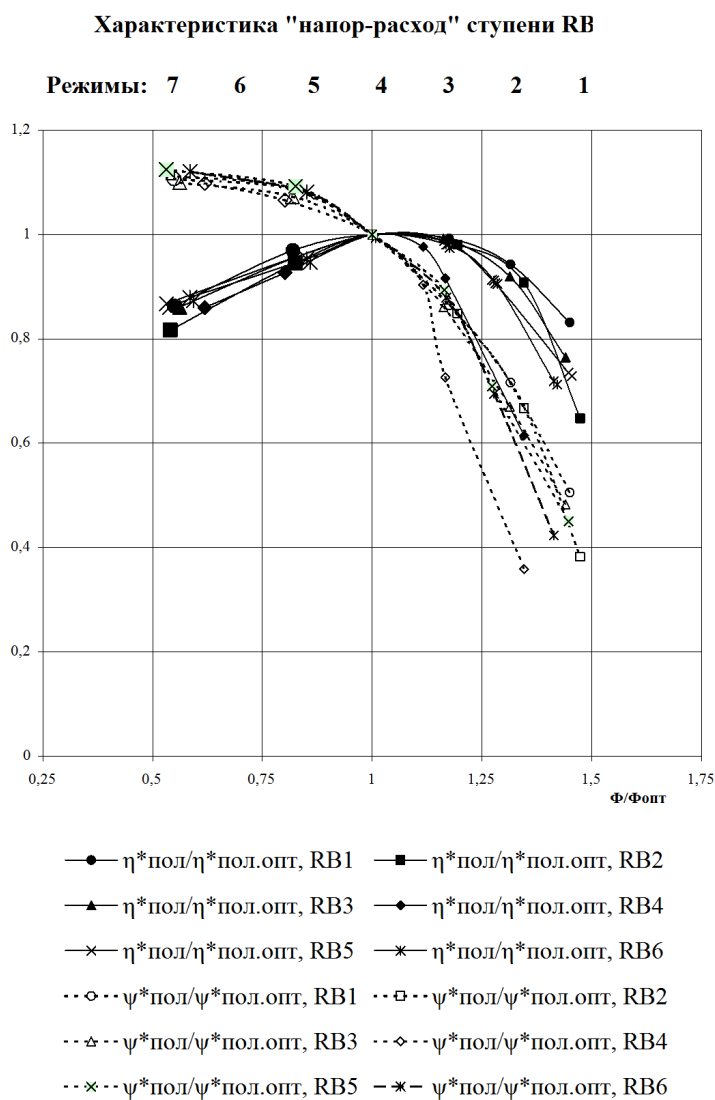


Рис. 1. Характеристика «напор расход» базовой ступени RB.

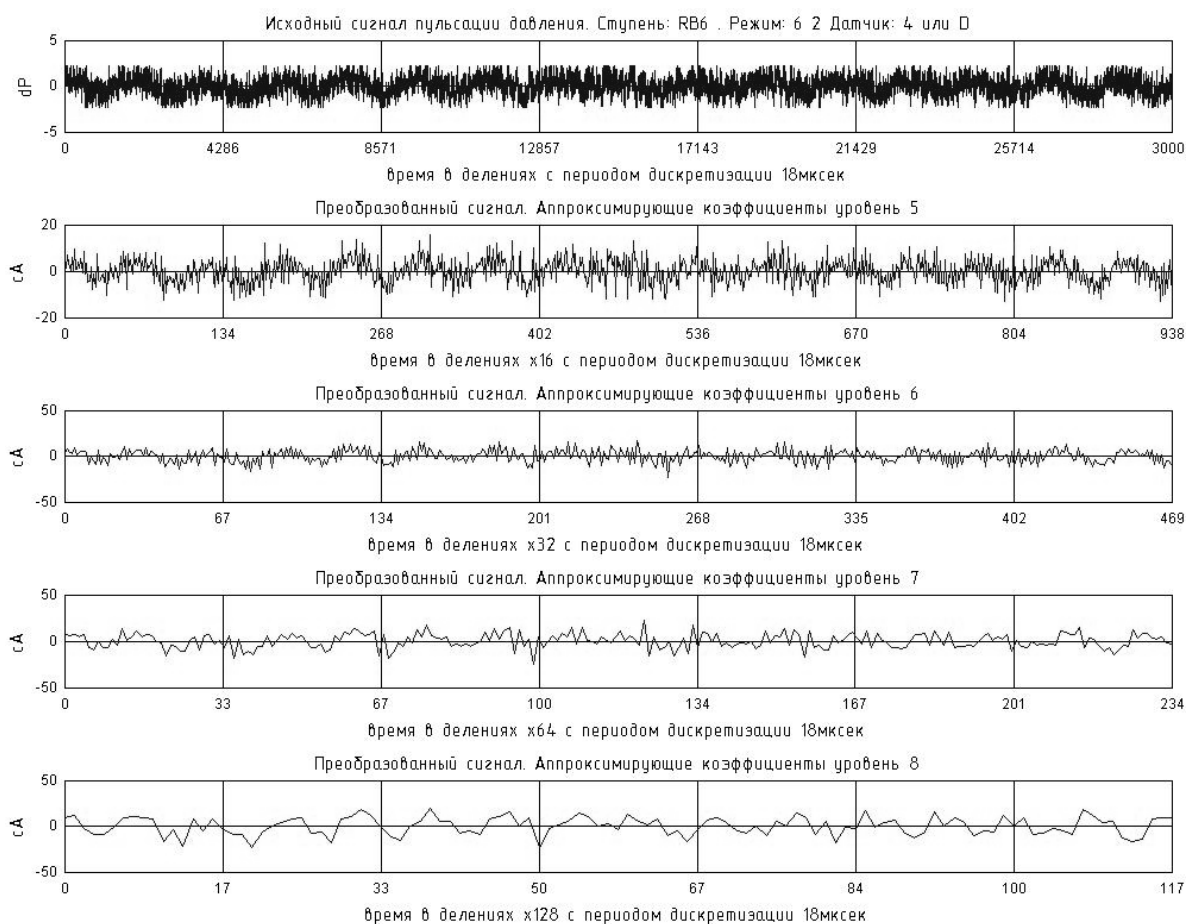


Рис. 2 Исходный и разложенный сигналы (аппроксимирующие коэффициенты с 5 по 8 уровни), датчика  $P_{4II}$ , ступени RB6, режима  $\Phi_6/\Phi_{опт}=0,585$ .

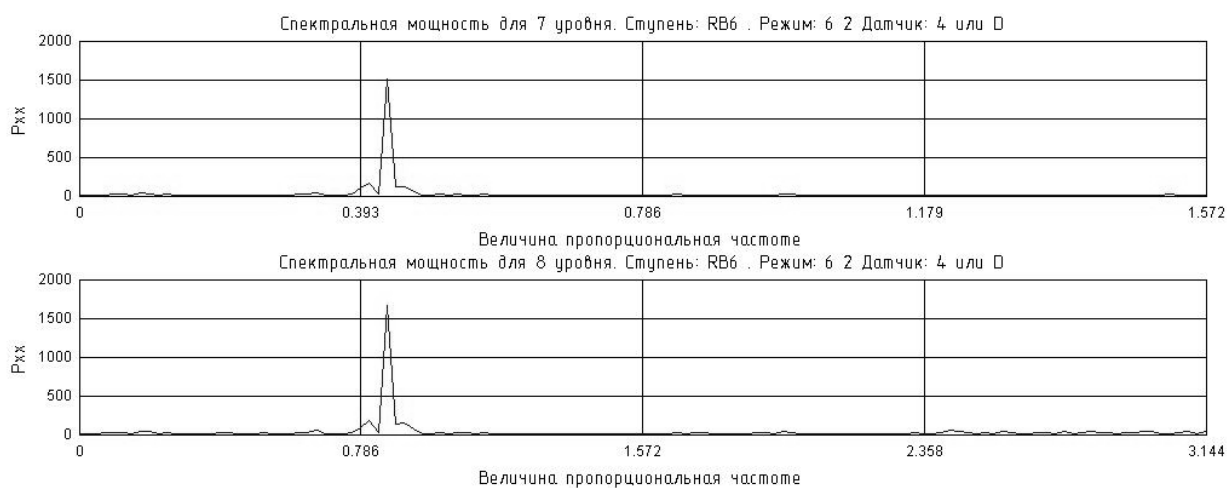


Рис. 3. Спектральная плотность мощность для аппроксимирующих коэффициентов разложения с 7 по 8 уровни для датчика  $P_{4II}$ , ступени RB6, режима  $\Phi_6/\Phi_{опт}=0,585$ .

Табл. 1. Сводные результаты обработки данных для ступени RB.

Серия	Положение режима на характеристике	Номер датчика	$\Phi/\Phi_{опт}$	$\alpha_2$	$T_{P_{xxmin}}$ мс	$T_{P_{xxmax}}$ мс	$P_{xxmin}$	$P_{xxmax}$
RB1..5	предсрыв	2, $P_{3II}$	0,54	15.6	60	87	1200	250
RB1..5	предсрыв	3, $P_{4I}$	0,54	15.6	60	87	300	300
RB1..5	предсрыв	5, $P_{6I}$	0,54	15.6	60	87	100	2000
RB1..5	срыв	2, $P_{3II}$	0.82	9.6	60	87	500	1000
RB1..5	срыв	3, $P_{4I}$	0.82	9.6	60	87	50	1000
RB1..5	срыв	5, $P_{6I}$	0.82	9.6	60	87	100	4000
RB2	предсрыв	2, $P_{3II}$	0.54	13.7	60	65	220	10
RB2	предсрыв	3, $P_{4I}$	0.54	13.7	60	65	15	5
RB2	предсрыв	5, $P_{5I}$	0.54	13.7	60	65	1000	10
RB2	срыв	2, $P_{3II}$	0.825	8.5	55	87	1500	200
RB2	срыв	3, $P_{4I}$	0.825	8.5	55	87	200	150
RB2	срыв	5, $P_{5I}$	0.825	8.5	55	87	1000	200
RB3	предсрыв	2, $P_{3II}$	0.561	13	48	65	2000	50
RB3	предсрыв	3, $P_{4I}$	0,561	13	48	65	300	50
RB3	предсрыв	4, $P_{4II}$	0,561	13	48	65	1000	50
RB3	срыв	2, $P_{3II}$	0.818	8.6	45	65	3000	100
RB3	срыв	3, $P_{4I}$	0.818	8.6	45	65	400	100
RB3	срыв	4, $P_{4II}$	0.818	8.6	45	65	40	450
RB4	предсрыв	2, $P_{3II}$	0.619	12.5	40	45	4000	100
RB4	предсрыв	3, $P_{4I}$	0.619	12.5	40	45	900	50
RB4	предсрыв	4, $P_{4II}$	0.619	12.5	40	45	2000	150
RB4	срыв	2, $P_{3II}$	0.801	9.4	25	30	1200	100
RB4	срыв	3, $P_{4I}$	0.801	9.4	25	30	1000	50
RB4	срыв	4, $P_{4II}$	0.801	9.4	25	30	2000	200
RB6	предсрыв	2, $P_{3II}$	0.585	13.7	45	50	3000	150
RB6	предсрыв	3, $P_{4I}$	0.585	13.7	45	50	1500	100
RB6	предсрыв	4, $P_{4II}$	0.585	13.7	45	50	600	50
RB6	срыв	2, $P_{3II}$	0.851	8.9	25	30	1200	50
RB6	срыв	3, $P_{4I}$	0.851	8.9	25	30	1000	100
RB6	срыв	4, $P_{4II}$	0.851	8.9	25	30	1500	150

В **седьмой главе** приводятся рекомендации по выбору длины интервала от суммарного времени работы алгоритма и времени, затрачиваемого исполнительными механизмами защиты, предлагается следующая схема с 90% перекрытием. Выбранная запись сигнала с датчика в определенный временной интервал подвергается первому анализу, при следующем анализе из этой записи удаляются первый десять процентов записи и в конце добавляются новые десять процентов. Приводится дополнение для решения об устойчивости срыва по периоду, вследствие того, что вычисленные периоды за разные промежутки времени принимают неравные критические значения, итоговое значение принимается по количеству интервалов с критическими значениями периода за несколько промежутков, на которых производилось определение периода. Предлагается алгоритм защиты и схема системы предпомпажной защиты центробежного компрессора. Были выбраны ограничивающие условия: длина временного интервала не менее 60...90с для 85% участков, количество участков в этом интервале от 60 до 120 при временной длине 1...7с.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработан метод выявления нестационарных пульсаций давления на основе алгоритма, основанного на вейвлет-преобразования, спектральной плотности мощности и корреляционном анализе. Проверена работа алгоритма на большом количестве результатов испытаний различных модельных ступеней и расходов (были обработаны более 500 цифровых записей, на основании которых получено более 20 тысяч графиков).

2. Были выделены из информационных условий числовые значения, на основании взаимосвязи между которыми в установленных границах можно определить предпомпажное состояния центробежного компрессора.

3. Разработаны принципы для определения периодического сигнала, построенные не на жёстком задании величины, а на диапазоне значений периода при срыве. Введены новые дополнительные пограничные условия для сужения диапазона основных условий.

4. На основании выбранных информационных условий разработан алгоритм для антипомпажной защиты, по которому функционирует система защиты центробежного компрессора. Итоги применения разработанного алгоритма подтвердили возможность применения признакового способа. Введение дополнительных пограничных условий позволило расширить зону допустимой безопасной работы с высоким *КПД* у более широкого класса ступеней со специфическими особенностями возникновения вращающегося срыва, вследствие того, что антипомпажная система срабатывает до наступления помпажа и только при появлении реальной опасности для работы компрессора.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Драгункин, Д. Ю.** Применение анализа нестационарных процессов для повышения надежности устойчивой работы компрессора [Текст]/ Д.Ю. Драгункин, А.А. Лебедев, Р.А. Измайлов // XXXIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 2 ч. – СПб – 2005 г. – 2 ч.; С. 130–131.
2. **Измайлов, Р. А.** Вейвлет-преобразования для анализ нестационарных процессов в центробежном компрессоре [Текст]/ Р.А. Измайлов, А.А. Лебедев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – т. 2. – С. 179–182.( издание ВАК).
3. **Измайлов, Р. А.** Повышение надежности работы компрессорной установки с использованием метода вейвлет-преобразования. [Текст]/ Р.А. Измайлов, А.А. Лебедев // Компрессорная техника и пневматика. – 2008. №2. – С. 21–23. ( издание ВАК).
4. **Измайлов, Р. А.** Применение вейвлет-преобразования для исследования сигналов нестационарных процессов центробежного компрессора [Текст]/ А.А. Лебедев, Р.А. Измайлов // Труды XIV Международной научно-технической конференции по компрессорной технике: в 2 т.- Казань- 2007. – 2т.; С.107–113.
5. **Лебедев, А. А.** Применение вейвлет-преобразования для анализа нестационарных процессов в центробежном компрессоре [Текст]/ А.А. Лебедев, Р.А. Измайлов // XXXIV Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 2 ч. – СПб – 2006 г. – 2 ч.; С. 95–96.