

На правах рукописи

Крутиков Тимофей Евгеньевич

СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРЕДПОМПАЖНОГО СОСТОЯНИЯ
ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Специальность 05.04.06 – «Вакуумная, компрессорная
техника и пневмосистемы»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2003

Работа выполнена на кафедре «Компрессорной, вакуумной и холодильной техники» 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
Бухарин Николай Николаевич

кандидат технических наук
Караджи Вячеслав Георгиевич

Ведущая организация: ОАО «Невский завод»

Защита состоится «26» декабря 2003 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д212.229.09 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, ауд. 130 главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «24» ноября 2003 года

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д212.229.09
д.т.н., профессор

Хрусталёв Б.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность данной работы. Центробежные компрессоры применяются во многих производственных процессах: при добыче нефти и газа, на магистральных газопроводах, для наддува ДВС, в газотурбинных установках, для получения сжатого воздуха в системах общего назначения. Одна из основных проблем – борьба с повышенной вибрацией, создаваемой преимущественно аэродинамическими причинами, и предотвращение помпажа. Проблема обеспечения устойчивой работы компрессора в широком диапазоне изменения производительности, частоты вращения ротора и т.п. имеет очень большое значение, особенно при повышенном уровне давления перекачиваемой среды (нагнетателей природного газа, цикловых компрессоров химических производств). Для этого необходимо исследование нестационарных процессов в центробежных компрессорах с применением современных малоинерционных измерителей и процедур обработки информации, пригодных для периодических процессов, происходящих на фоне высокого уровня случайных составляющих, характерных для турбулентного потока с крупномасштабными пульсациями из-за отрывного характера движения газа в проточной части. Сложный характер процессов заставляет применять процедуры статистического анализа, в частности корреляционный анализ, что позволяет глубже понять физику процесса и обнаружить появление характерных процессов, в том числе вращающегося срыва, прогнозируя тем самым возможность попадания компрессора в зону помпажа. Построение систем антипомпажного диагностирования на основе предлагаемых принципов позволяет увеличить надёжность установок, расширить диапазон работы. Таким образом, тема диссертации является актуальной для компрессоростроения.

Цель и задачи работы. Основная цель работы – разработка системы диагностирования предпомпажного состояния центробежного компрессора с использованием физических особенностей аэродинамических нестационарных процессов в проточной части и современных методов обработки информации, разработка метода обработки нестационарных пульсаций давления и способа обработки данных, полученных в результате проведенных ранее экспериментов, обработка и анализ имеющихся данных для определения источника возникновения вращающегося срыва, разработка технических рекомендаций по построению систем диагностики предпомпажного состояния на основе признакового метода.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать имеющиеся данные экспериментального исследования нестационарных процессов с измерением быстроменяющихся величин в типовых ступенях центробежного компрессора,
- создать программный комплекс по обработке и представлению данных измерений пульсаций нестационарных процессов и обработать результаты представительных

серий экспериментов,

- провести анализ полученных результатов с точки зрения достоверности определения источников возникновения вращающегося срыва и наличия ложных срабатываний системы диагностики предпомпажного состояния,
- сопоставить полученные результаты с существующими моделями нестационарных процессов в центробежном компрессоре, в частности, вращающегося срыва,
- разработать структурную схему и алгоритм системы диагностики предпомпажного состояния в проточной части центробежного компрессора.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- детально обработаны с применением современных программных средств результаты исследования нестационарных процессов с измерением быстроменяющихся величин в различных типах проточных частей модельных ступеней на различных режимах работы,
- исследовано влияние геометрии проточной части на границу появления вращающегося срыва, а также сделаны выводы о местах и причинах образования вращающегося срыва,
- выявлены характерные особенности процессов и сформулированы критерии, позволяющие обнаружить вращающийся срыв (предвестник помпажа) на фоне широкого спектра существующих в проточной части пульсаций,
- разработан новый способ определения периодического характера явлений (вращающегося срыва) с использованием преобразования Гильберта,
- создан макет новой системы антипомпажной защиты, которая позволяет без больших изменений конструкции компрессора расширить зону возможной работы компрессора при высоких значениях КПД.

Практическая ценность работы заключается в том, что исследованы причины и места возникновения вращающегося срыва в типовых проточных частях центробежного компрессора, пригодных для применения, например, в нагнетателях природного газа, что позволяет построить физическую картину нестационарных процессов. На основе используемых принципов разработана система антипомпажной защиты, позволяющая обеспечить надежность функционирования и расширить допустимый диапазон работы компрессора. Результаты работы использованы при разработке систем антипомпажной защиты на газоперекачивающих агрегатах нового поколения и применяются в учебном процессе.

Достоверность и обоснованность сделанных выводов и рекомендаций определяется:

- применением при ранее проведенных экспериментах современных систем измерения, в том числе автоматизированного информационно-измерительного комплекса, системой статических и динамических градуировок, использованием дублирования при проведении эксперимента,
- использованием при обработке сигналов сертифицированных программных

продуктов MATLAB и Agilent VEE,

- использованием способов цифрового анализа, обеспечивающих наименьший уровень искажения текущих значений в интересующем диапазоне частот и отсутствие фазовых сдвигов,

- совпадением полученных результатов обработки опытных данных с опубликованными в научной литературе.

Апробация работы. Материалы исследований по теме диссертации опубликованы в сборниках “Материалы межвузовской научной конференции. XXVIII и XXIX недели науки СПбГТУ”, а также докладывались и обсуждались на пятом международном симпозиуме “Потребители - производители компрессоров и компрессорного оборудования - 1999” (СПб, 1999) и XII международной научно-технической конференции по компрессорной технике (Казань, 2001) и на семинарах Института турбомашин Технического Университета г. Ганновера (ФРГ, 2002) и кафедры КВиХТ СПбГПУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, выводов, списка используемой литературы и приложения. Общий объем работы составляет 240 страниц, в том числе 140 рисунков и 3 таблицы, список литературы (56 наименований), 22 страницы приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована необходимость, актуальность и важность темы и сформулирована цель исследования в общем виде.

В первой главе рассмотрено состояние проблемы и поставлены задачи исследования. Рассмотрены вопросы аэродинамики нестационарных процессов в проточной части центробежного компрессора и помпажа. В данной работе анализируются результаты, полученные для ступеней с рабочими колесами закрытого типа, поэтому рассматриваются только аэродинамические процессы. Везде предполагается отсутствие связи аэродинамических и упругих характеристик системы. Во всех случаях рассматривается только дозвуковое течение.

Рассмотрены виды вращающегося срыва, возникающие в центробежном компрессоре. Первый вид, обнаруженный У. Янсенем и исследованный в работах под руководством проф. Р. А. Измайлова, а также в работах Я. Сеноо и др., возникает из-за отрыва закрученного потока на торцевых стенках безлопаточного и лопаточного диффузора при некоторых малых значениях угла входа потока. Второй вид вращающегося срыва может появляться из-за отрыва потока при отрывном обтекании решеток рабочего колеса, лопаточного диффузора и иных решёточных систем (рёбер во всасывающей трубке, входного направляющего аппарата, обратно-направляющего аппарата). Этот срыв отличается повышенной скоростью

перемещения зон срыва. Третий вид вращающегося срыва может возникать при течении закрученного потока в зазоре между покрывающим диском и торцевой стенкой корпуса аналогично неустойчивости течения, обнаруженной в опытах Грегори, Стюарта и Уолкера.

Собственно вращающемуся срыву иногда предшествует явление, названное "стоячим" срывом. Оно возникает в ступени с достаточно высоким уровнем окружной неравномерности (типа создаваемой лопаточным диффузором) и проявляется в образовании нескольких зон отрыва, не перемещающихся по окружности ($\omega_3=0$).

Во второй главе описаны объекты исследования.

Для анализа нестационарных процессов и разработки процедур диагностики предпомпажного состояния компрессора были использованы результаты экспериментального исследования трех модельных ступеней промышленных нагнетателей природного газа. Экспериментальное исследование аэродинамики проточной части выполнено в СПбГПУ группой под руководством проф. Ю. Б. Галёркина, исследование нестационарных процессов – группой под руководством проф. Р. А. Измайлова. Серия экспериментов "KZ" проведена на модели первой ступени нагнетателя 395-21-1 ПО "Невский завод", серия "NC" - на модели первой ступени нагнетателя НЦ-16/76-1,44, а серия "RB" - на модели базовой ступени кафедры КВиХТ СПбГПУ. Рабочая среда – воздух, всасывание из атмосферы. Эквивалентные окружные скорости по числу Маха $M_u = 0,6$ и $0,8$ соответствуют уровню u_2 для нагнетателей природного газа. В качестве примера на рис. 1 приведена схема проточной части модельной ступени нагнетателя природного газа 395-21-1 ПО "Невский завод". Геометрические параметры исследованных проточных частей приведены в табл. 1. В сериях KZ и NC использовались лопаточные диффузоры, в RB – безлопаточный, рабочие колёса – "насосного" типа.

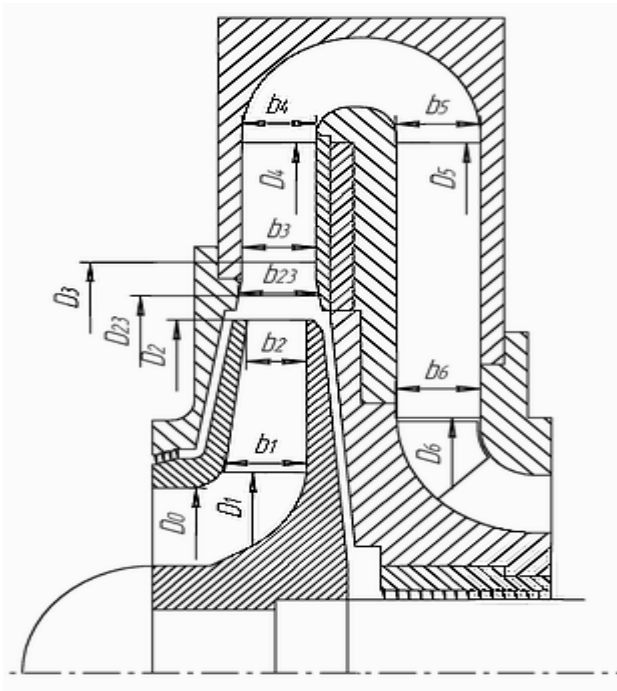


Рис. 1. Схема проточной части модельной ступени KZ нагнетателя 395-21-1 ПО «Невский завод»

Параметр	395-21-1	НЦ-16/76-1,44	Базовая КВиХТ
D_2 , мм	362,9	385,1	390
D_1 , мм	204,7	233,3	222,3
D_0 , мм	189,9	227,4	210,6
$D_{вг}$, мм	113,9	130	113,1
b_2 , мм	25,3	26,45	27,3
b_1 , мм	35,0	29,1	38,6
θ , град	7	2	7,41
$\beta_{л1}$, град	26	27	28
$\beta_{л2}$, град	22,5	32	32
z_2	12	15	11
δ , мм	4	3,7	5,4
δ_3 , мм	7,7	8,8	-
b_3 , мм	31,2	36,6	23,3
b_3/b_2 , мм	1,233	1,384	0,853
D_3 , мм	422	443,1	-
D_4 , мм	544,4	560,5	565,5
$\alpha_{л3}$, град	15	13	-
$\alpha_{л4}$, град	30	30	-
z_3	18	14	-
b_5 , мм	35,5	35,5	31,2
b_6 , мм	35,5	44,1	41,8
D_5 , мм	544,4	560,5	565,5
D_6 , мм	262	284	253,3
z_5	16	16	16
δ_{max} , мм	23	20,15	23
$\alpha_{л5}$, град	33	33	37
$\alpha_{л6}$, град	90	90	90
D_{max} , мм	650	650	651,4
$D_{нд}$, мм	581,4	580,9	597,5

Табл. 1 Геометрические параметры испытанных ступеней

В третьей главе приводится методика экспериментального исследования. Рассматриваются характерные признаки нестационарных процессов в проточной части и производится выбор метода исследования. Описывается автоматизированная система для исследования нестационарных аэродинамических процессов, которая была использована для получения информации. В состав системы входят 6 каналов измерения быстроменяющегося давления, канал синхронизации физического времени, цифровая подсистема, персональный компьютер, а также осциллографы и частотомер. Работа системы производится под управлением специального программного обеспечения. Быстродействие системы обеспечивается многоканальными аналого-цифровыми преобразователями с параллельным входом, время дискретизации от 18 до 900 мкс.

Рассмотрены методы диагностирования помпажа и существующие системы диагностики. Для диагностирования помпажа применяется параметрический и признаковый метод. Преимущественно используется параметрический способ диагностики, основанный на измерении расхода (как правило, по параметрам всасываемого газа). При этом обычно производительность компрессора при помпаже меньше производительности на номинальном режиме работы компрессора (при постоянной частоте вращения). Из-за больших погрешностей при измерении малого значения расхода, особенно при низких значениях частоты вращения (для компрессора, работающего при переменной частоте вращения, как в случае

нагнетателя природного газа), вводится так называемая “уставка” (смещение границы срабатывания системы антипомпажной защиты на 10% от значения производительности, соответствующей возникновению помпажа), которая сужает зону возможной работы компрессора. Собственно граница помпажа определяется при заводских или наладочных испытаниях по характерному шуму.

При предлагаемом признаковом способе критерием близости помпажа служит появление вращающегося срыва. Процесс вращающегося срыва возникает раньше помпажа (т.е. при большей производительности) при уменьшении расхода и находится в непосредственной близости от границы помпажа. Вращающийся срыв обладает соответствующими признаками, позволяющими определять появление и развитие вращающегося срыва на фоне других процессов.

В четвертой главе приводится описание методики обработки данных. Для процесса вращающегося срыва характерно возрастание амплитуды (по сравнению с предшествующим режимом) и изменение частоты пульсаций давления, а также появление фазовых сдвигов между сигналами от двух датчиков, расположенных на одном и том же диаметре, разнесенных по угловой координате. Вращающийся срыв – это сравнительно низкочастотный процесс в абсолютном движении. Срывные зоны медленно вращаются вокруг оси с частотой, не кратной частоте вращения ротора.

Исходя из вышеперечисленных особенностей процесса вращающегося срыва, предложена следующая методика обработки информации. Поскольку вращающийся срыв – процесс низкочастотный и в общем случае его период не связан с периодом вращения ротора и периодом колебаний, вызванных распространением вращающихся следов от лопаток, то исходные данные фильтруются с помощью фильтра низкой частоты (ФНЧ), при этом для анализа используется только область низких частот в диапазоне до 100 Гц (т.е. ниже частоты вращения). Для фильтрации данных в использованном программном продукте были применены два дискретных рекурсивных фильтра Чебышева второго типа, обеспечивающие монотонное изменение ослабления в полосе пропускания (максимально гладкое при $\Omega = 0$) и равновеликие пульсации в полосе непропускания. Нули фильтров этого типа располагаются на мнимой оси в s -плоскости, а полюсы — в левой полуплоскости. Квадрат амплитудной характеристики фильтров Чебышева типа II порядка n имеет вид

$$|H(\Omega)|^2 = 1 / (1 + \varepsilon^2 [T_n(\Omega_r) / T_n(\Omega_r/\Omega)]^2),$$

где Ω_r – наименьшая частота, на которой в полосе пропускания достигается заданный уровень ослабления.

Для компенсации фазового сдвига (реализации фильтрации без внесения временной задержки) применяется двунаправленная обработка сигнала. Первый проход фильтрации осуществляется обычным образом, а затем полученный выходной сигнал фильтруется повторно - от конца реализации к началу, что позволяет компенсировать фазовые сдвиги, при этом результирующий порядок фильтра увеличивается вдвое.

Для решения задачи обнаружения периодической составляющей сигнала на фоне высокого уровня шумов (аэродинамической природы) был применен метод корреляционного анализа. В частности, были использованы способы анализа сигнала с помощью авто- и кросс-корреляционных функций.

Функция взаимной корреляции, или кросс-корреляционная функция $R_{xy}(\tau)$ показывает меру статистической связи между сигналами $x(t)$ и $y(t)$ в зависимости от их взаимного смещения (параметра задержки) τ во временной области, она

определяется выражением:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t+\tau)dt.$$

Автокорреляционная функция (АКФ) $R_{xx}(\tau)$ является частным случаем, в котором $x(t)=y(t)$, и определяется выражением:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt.$$

При цифровой обработке данных использовалась несмещенная оценка кросс-корреляционных функций: $\hat{R}_{xy}[m] = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]y[n+m]$,

где N - число отсчётов данных $x[n]$, $n=0, \dots, N-1$; m - индекс временного сдвига, $N \gg m$.

Значения автокорреляционной функции нормируются по среднеквадратическому значению амплитуды соответствующего сигнала.

Хотя традиционно для выявления периодичности автокорреляционной функции (стационарного процесса) используется длительная реализация исследуемого сигнала, по результатам исследований проф. Р.А. Измайлова для определения процесса зарождения вращающегося срыва в проточной части центробежного компрессора (сугубо нестационарного процесса) лучше рассчитывать значения автокорреляционной функции на коротких временных интервалах (т. е. рассматривать текущие автокорреляционные функции). Обработка длинных реализаций (длина реализации ≈ 60 сек.) при большом значении временного сдвига ($\tau \approx 2,5$ сек.) не позволяет обнаружить локально возникающий срыв. Корреляционная функция при этом имеет вид, соответствующий широкополосному случайному шуму. Поэтому для обнаружения локального срыва необходимо проводить анализ на коротких временных интервалах, на которых сигнал можно считать стационарным, определяя локальные корреляционные функции.

При рассмотрении дисперсного характера распространения пульсаций в проточной части центробежного компрессора, т.е. когда характеристики распространения сигналов зависят от частоты, использовано преобразование Гильберта.

Также в этой главе рассмотрены особенности используемых цифровых записей пульсаций давления, полученных при эксперименте, описан программный комплекс и процедуры обработки данных.. Длина записей составляет от 0,16 сек до 59 сек. Файлы небольшой длины не использовались в дальнейшем для обработки с помощью корреляционного анализа. При обработке данных удалялась постоянная составляющая и устранялись единичные выбросы. В непосредственной близости от границы помпажа и при помпаже измерения практически не производились (особенно при высоких окружных скоростях $u_2 = 275$ м/сек).

Основным способом обработки данных при написании данной работы была компьютерная программа, написанная автором на графическом языке программирования Agilent VEE PRO, в котором использована интегрированная техническая комплексная платформа MATLAB.

В основе разработанной системы лежит программа, использующая корреляционный анализ, как средство, диагностирующее появление вращающегося срыва и вычисляющее его параметры. После предварительной обработки сигналы от

датчиков подвергаются анализу с помощью авто- и кросс-корреляционных функций, а также подвергаются обработке с помощью преобразования Гильберта. При превышении максимумами АКФ заданных значений выдается сообщение об определении вращающегося срыва. Изменение задаваемых величин позволяет обнаруживать срыв различной интенсивности. В системе использовались два уровня срабатывания:

а) если уровни достигаемых максимумов нормированной АКФ превышали 0,4, но не достигали 0,6, то диагностировался так называемый предсрыв,

б) если уровни достигаемых максимумов нормированной АКФ превышали 0,6, то диагностировался развитый вращающийся срыв.

Таким образом были заданы так называемые «нижний» и «верхний» уровни срабатывания. Если при расчете уровней АКФ система покажет превышение одного из заданных уровней сигналами от нескольких датчиков одновременно и на нескольких перекрывающихся сегментах расчета, следующих друг за другом, то это можно называть правильным срабатыванием системы и трактовать как обнаружение в проточной части либо предсрыва, либо развитого срыва. Точечные (локальные на некотором временном интервале) превышения заданных уровней (в основном нижнего) единичными датчиками и/или на отдельных сегментах расчета, не используются для принятия решений о возникновении срыва.

С помощью вычисленных кросс-корреляционных функций определялись относительные угловые скорости вращения зон срыва и их число. В качестве дополнительного критерия обнаружения срыва используются геометрические параметры проекции на комплексную плоскость аналитического сигнала, полученного с помощью преобразования Гильберта.

В пятой главе приводятся результаты обработки данных полученные в результате 12 экспериментов, выполненных при $u_2 = 206$ и 275 м/сек, для 6...7 значений

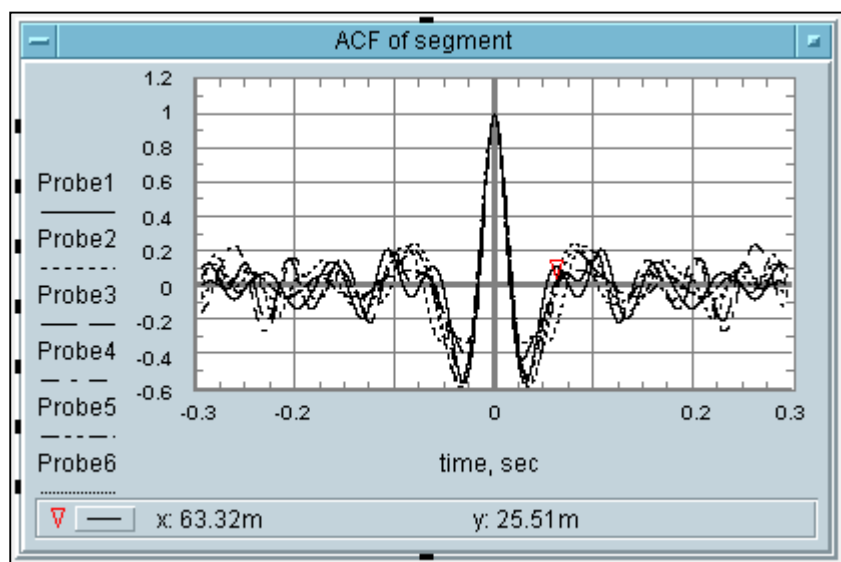


Рис. 2 АКФ на одном из сегментов на режиме максимального расхода ($\Phi=0,0694$), KZ-1

производительности – от максимальной до границы помпажа, с измерением нестационарных давлений в 3 основных типах проточных частей и одном промежуточном (эксперимент KZ-5).

Рассмотрим результаты обработки данных, полученных при эксперименте “KZ-1” в проточной части модельной ступени нагнетателя 395-21-1 при $M_u=0,6$. На режиме

максимального расхода наблюдаются в основном высокочастотные колебания, обусловленные окружной неравномерностью. Уровень флуктуаций и хаотичность пульсаций - наибольшие из-за отрывного обтекания решеток рабочего колеса и ЛД с большими отрицательными углами атаки. Угол потока на выходе из рабочего колеса составляет $\alpha_2=32^\circ$.

Предварительно обработанные сигналы пульсаций давления в одинаковых

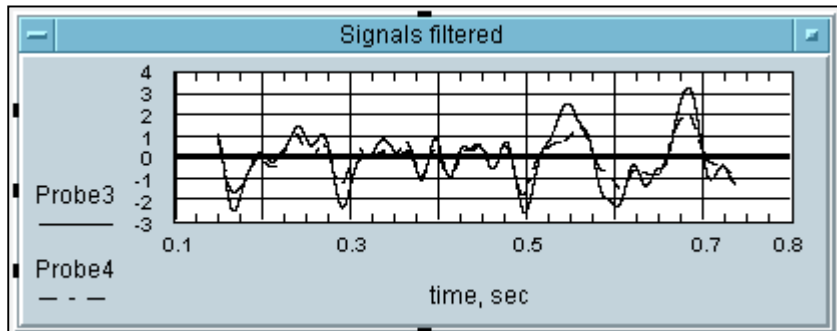


Рис. 3 Пульсации давления за ЛД на режиме зарождающегося срыва, $\Phi \approx 0,043$, KZ-1

измерительных сечениях на одинаковых диаметрах измерения, смещенных по угловой координате, не имеют сдвига фаз. Корреляционный анализ сигналов показывает, что пульсации давления в проточной части компрессора носят хаотический характер. Уровни достигаемого

максимума автокорреляционных функций на всех сегментах невысокие (рис. 2), срабатываний системы обнаружения вращающегося срыва не зафиксировано.

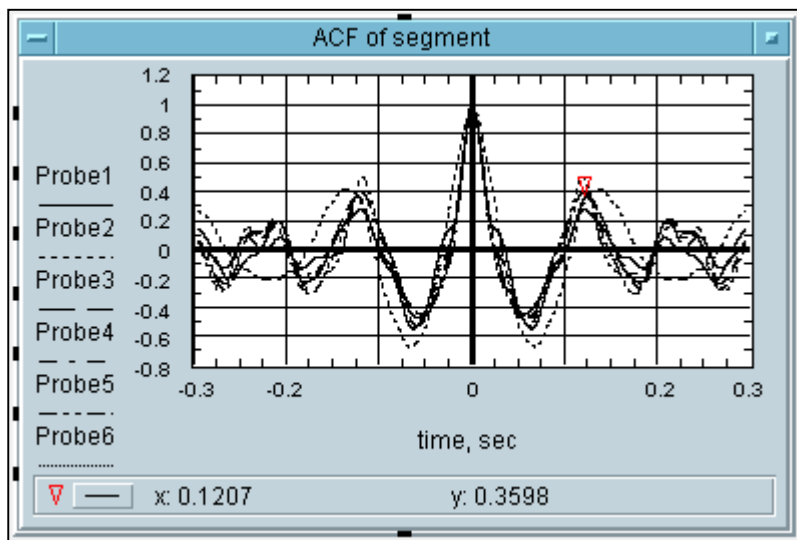


Рис. 4 АКФ на одном из сегментов на режиме зарождающегося срыва (предсрыва) ($\Phi=0,043$), KZ-1

При уменьшении расхода ($\Phi \approx 0,043$, $i_1 = 3^\circ$, $\alpha_2 = 15^\circ$, $i_3 = 2,5^\circ$, $i_5 = 16^\circ$) в проточной части наблюдаются явления, которые можно трактовать как предсрыв. В пульсациях давления наблюдаются кратковременные периодические участки с характерным периодом, близким периоду вращающегося срыва, соответствующие появлению срывных зон, исчезающих через непродолжительные отрезки времени. Пример

обработанного сигнала на этом режиме изображен на рис.3.

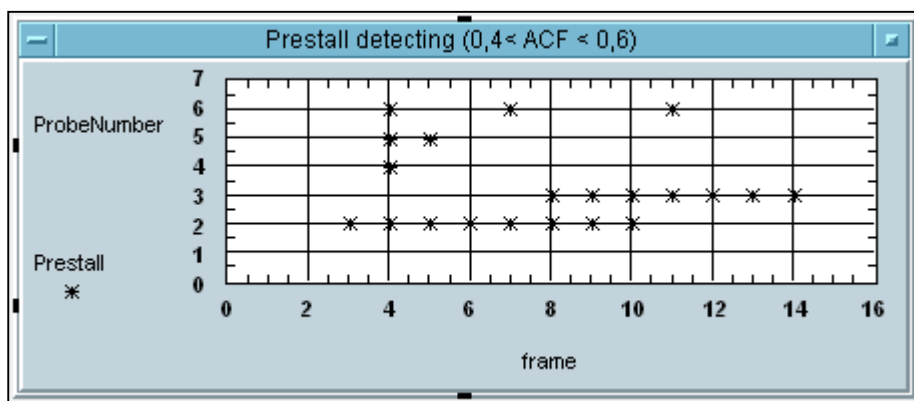


Рис.5 Карта срабатывания системы обнаружения вращающегося срыва на режиме предсрыва ($\Phi \approx 0,043$) KZ-1; По оси абсцисс – сегменты за время наблюдения.

Кратковременные автокорреляционные функции аналогичны полученным на предыдущих режимах, т.е. имеют хаотический характер, но на временных интервалах появления предсрыва уровни достигаемого максимума авторреляционной функции от некоторых

датчиков лежат в пределах $0,4 \dots 0,6$ (рис.4) и фиксируются системой обнаружения

предпомпажного состояния как предсрыв (рис.5). Период процесса при этом составляет 122 мсек.

При дальнейшем уменьшении расхода ($\Phi \approx 0,034$, $i_1 = 8^0$, $\alpha_2 = 13,5^0$, $i_3 = 4^0$, $i_5 = 12^0$) все большую область (по времени) занимают участки, соответствующие прохождению зон срыва.

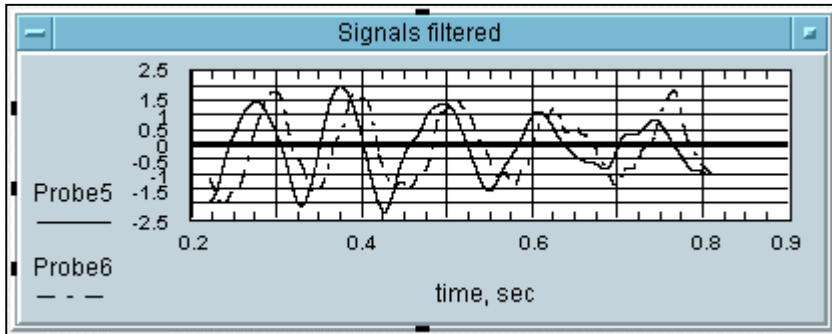


Рис.6 Отфильтрованные сигналы давления датчиков в поворотном колене на режиме срыва ($\Phi \approx 0,034$) KZ-1

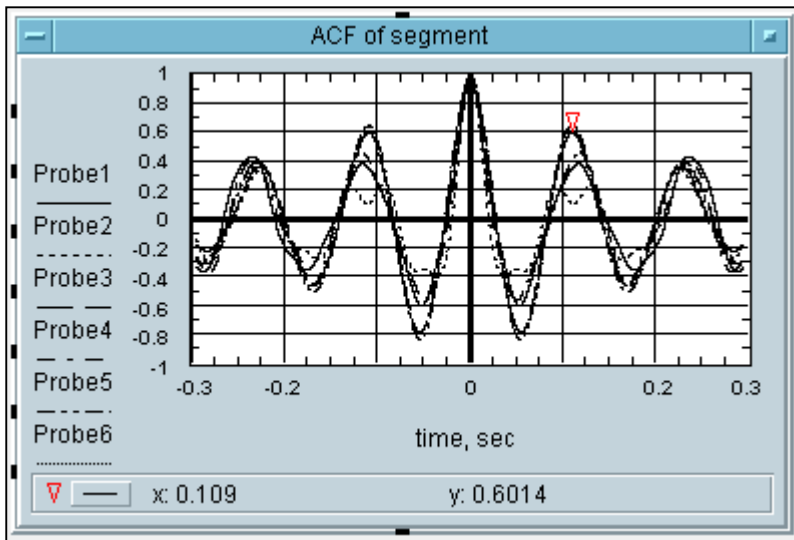
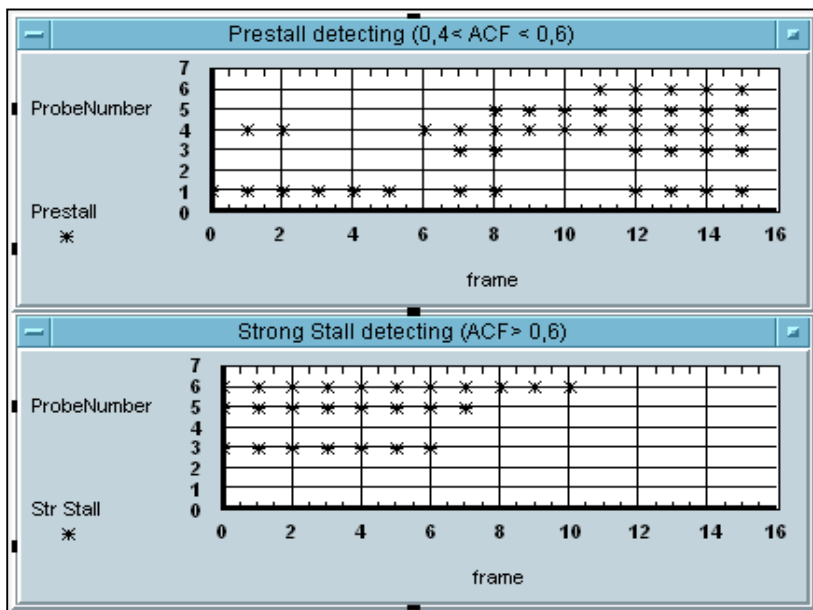


Рис. 7 АКФ на одном из сегментов на режиме срыва ($\Phi = 0,034$) KZ-1



Предварительно обработанные сигналы датчиков, расположенных в поворотном колене изображены на рис.6.

Периоды автокорреляционных функций сигналов ($T_{cp} \approx 115$ мс) от всех датчиков практически совпадают, а уровни

максимума лежат в диапазоне 0,4...0,6 и зачастую превышают 0,6 (рис.7). Моменты срабатывания системы обнаружения вращающегося срыва изображены на рис. 8. Аналитический сигнал, построенный на основе преобразования Гильберта, на этом режиме носит упорядоченный характер и имеет высокие амплитуды теперь уже не только в поворотном колене (как на предыдущем режиме), но и за лопаточным диффузором (рис. 9а – 9в).

Рассмотрим сигналы при меньшем расходе Φ , ($\Phi_{пом} < \Phi < 0,033$)

Рис. 8 Карта срабатывания системы обнаружения вращающегося срыва на режиме срыва ($\Phi \approx 0,034$) KZ-1; а) предсрыв; б) вращающийся срыв. По оси абсцисс – сегменты за время наблюдения.

соответствующем режиму сильно развитого

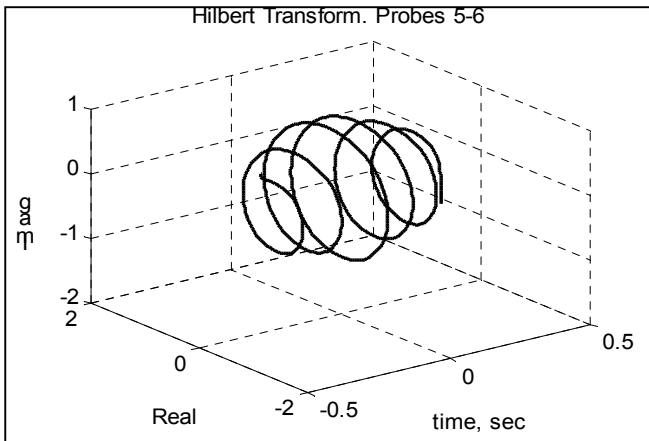


Рис. 9а Представление аналитического сигнала на основе преобразования Гильберта в трехмерном виде на режиме вращающегося срыва ($\Phi \approx 0,034$)

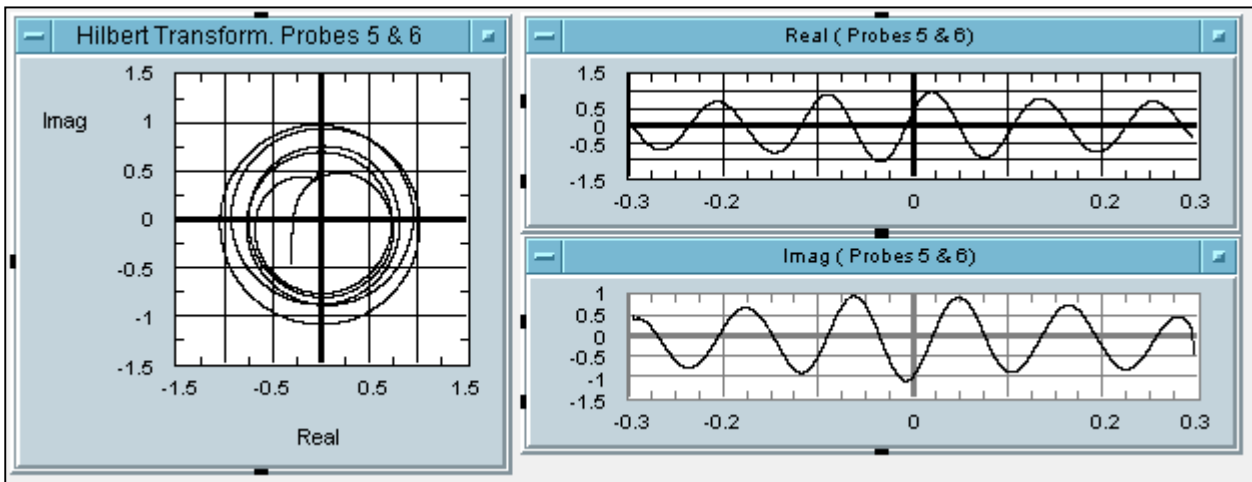


Рис.9б Проекция аналитического сигнала, (рис.9а) на комплексную плоскость. $\Phi \approx 0,034$ (вращающийся срыв)

Рис.9в Вещественная и мнимая части аналитического сигнала, полученного с помощью преобразования Гильберта при вращающемся срыве ($\Phi \approx 0,034$)

вращающегося срыва. Пульсации давления при этом имеют вид отчетливой периодической функции (рис.10), а автокорреляционные функции сигналов датчиков всех датчиков имеют очень высокий (более 0,8) уровень достигаемого максимума (рис. 11) и период $T_{cp} = 102$ мс. При этом наблюдаются отчетливые сдвиги фаз между

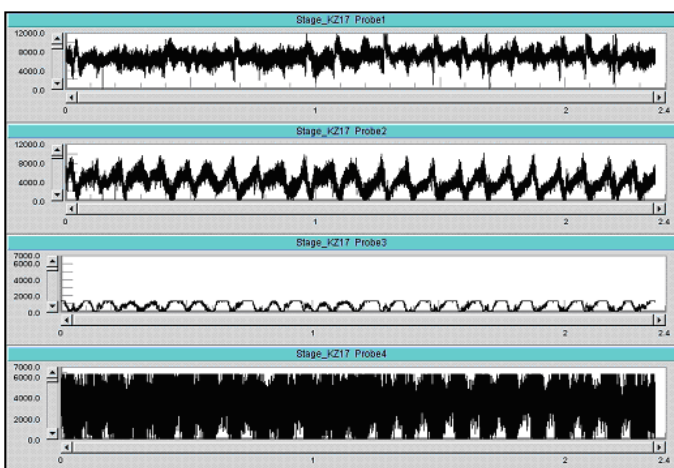


Рис. 10 Исходные пульсации давления на режиме развитого срыва, KZ-1

парами датчиков, установленными на одинаковых диаметрах измерения (рис. 12). Моменты срабатывания системы обнаружения вращающегося срыва изображены на рис. 13. Аналитический сигнал, построенный на основе преобразования Гильберта, на режиме развитого вращающегося срыва имеет отчетливые периодические составляющие с большой интенсивностью (рис.14а-в). (Данные аэродинамического эксперимента – см. рис. 15).

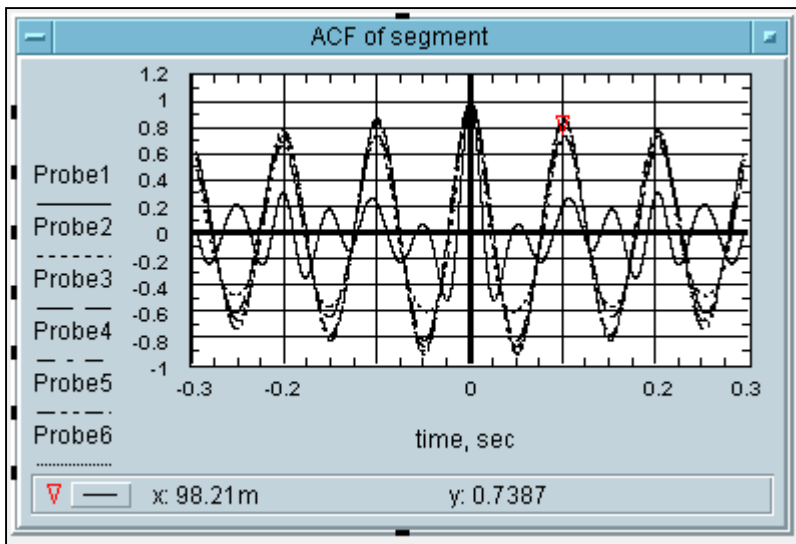


Рис. 11 АКФ, рассчитанные на режиме развитого срыва, ($\Phi < 0,033$) KZ-1

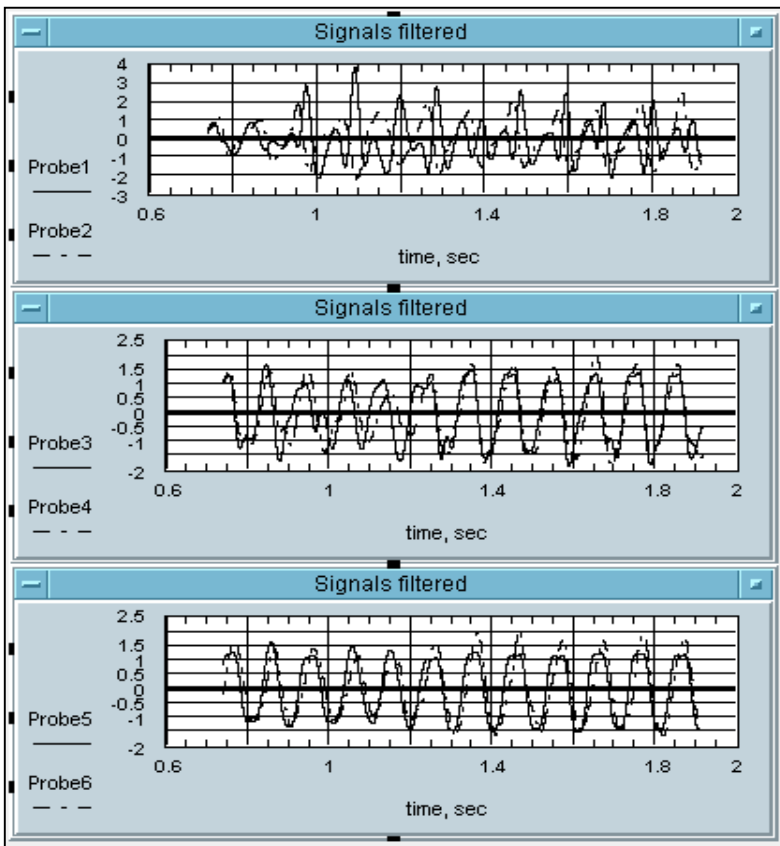


Рис. 12 Обработанные сигналы давления на режиме развитого срыва ($\Phi < 0,033$) KZ-1

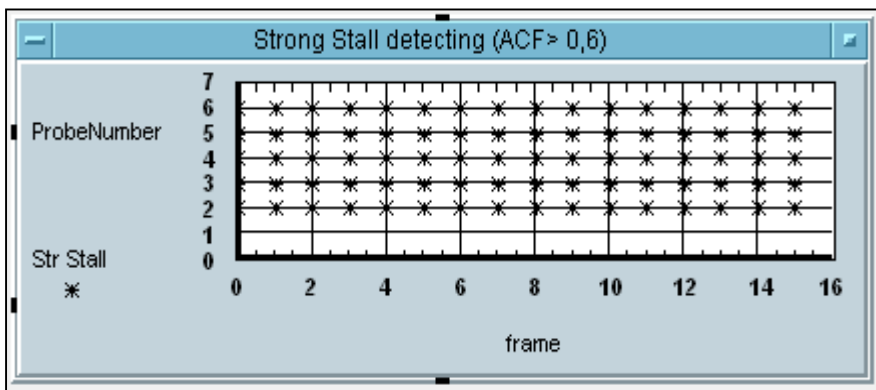


Рис. 13 Карта срабатывания системы обнаружения вращающегося срыва на режиме развитого срыва ($\Phi < 0,033$) KZ-1. (По оси абсцисс – сегменты за время наблюдения)

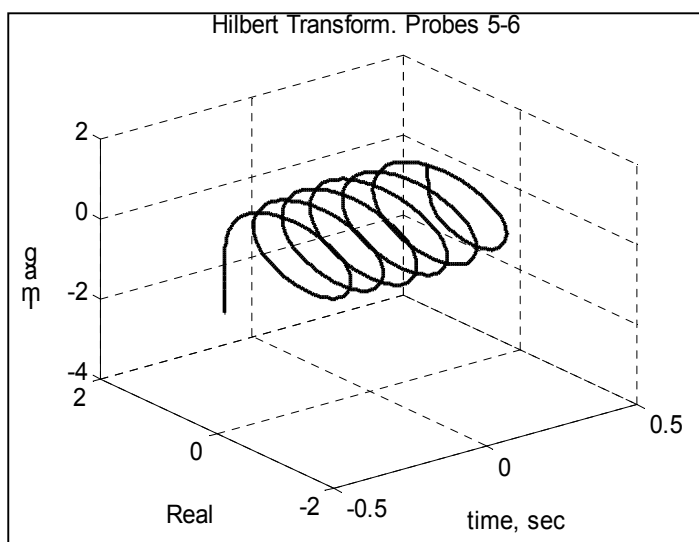


Рис. 14а. Трехмерное представление аналитического сигнала на основе преобразования Гильберта для режима вращающегося срыва (по оси абсцисс – время, по осям ординат и аппликат – соответственно вещественная и мнимая составляющие аналитического сигнала.)

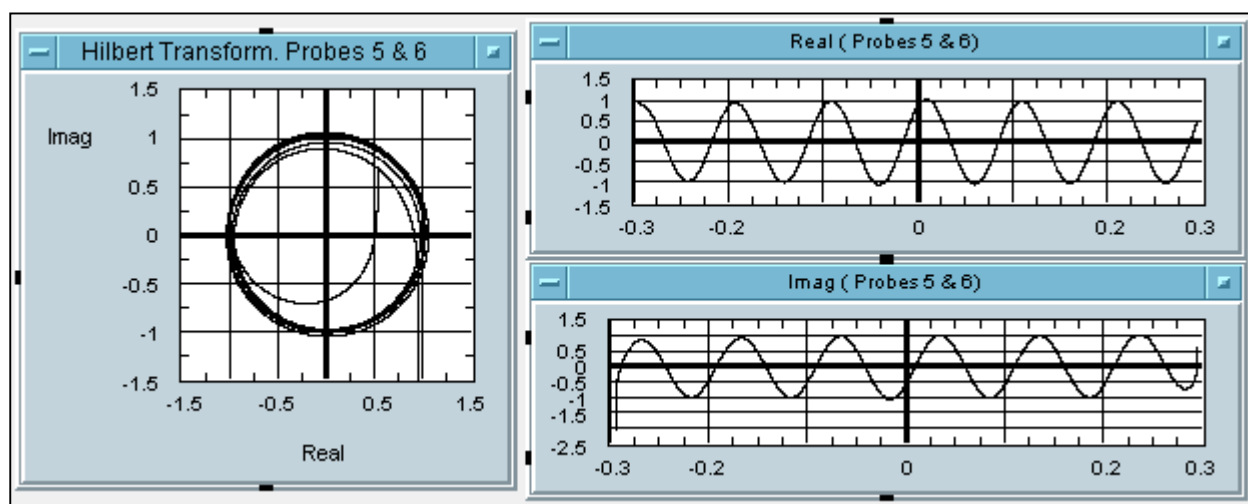


Рис. 14б Проекция аналитического сигнала, полученного с помощью преобразования Гильберта на комплексную плоскость (KZ-1), развитый срыв

Рис. 14в Вещественная и мнимая части аналитического сигнала, полученного с помощью преобразования Гильберта (KZ-1), развитый срыв

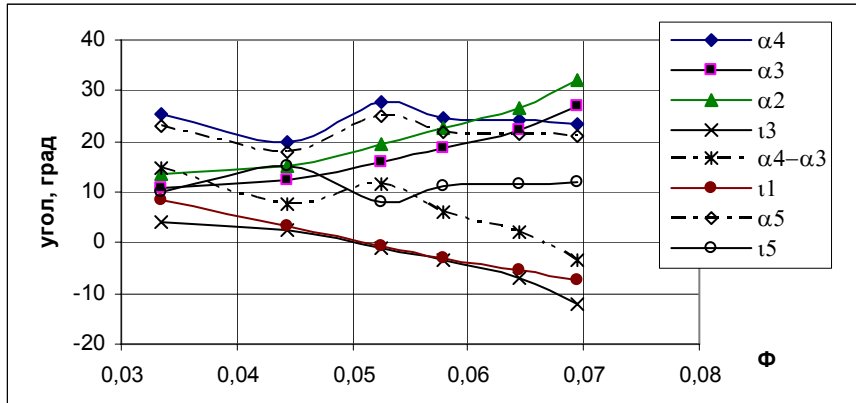
В шестой главе производится анализ полученных результатов. Рассмотрены результаты работы разработанной нами системы диагностики предпомпажного состояния с позиции обнаруживаемости вращающегося срыва. Сводка результатов аэродинамических экспериментов и параметров обнаруженного в результате функционирования системы диагностики предпомпажного состояния в исследованных проточных частях представлена в табл. 2. (ω_3 – относительная скорость перемещения зон срыва, z – число зон, T – период)

По результатам функционирования системы диагностики предпомпажного состояния можно сделать следующие выводы.

а) Подтверждена возможность диагностирования предпомпажного состояния на основе обнаружения явления вращающегося срыва в проточной части компрессора.

б) Обнаружены новые особенности нестационарных процессов при максимальных расходах.

Φ	α_4 , град	α_3 , град	α_2 , град	t_3 , град	$\alpha_4 - \alpha_3$, град	t_1 , град	α_5 , град	t_5 , град
0,0334	25,56	10,87	13,36	4,13	14,69	8,39	22,86	10,14
0,0444	19,93	12,37	15,18	2,63	7,56	3,11	17,73	15,27
0,0525	27,68	15,98	19,51	-0,98	11,70	-0,57	24,82	8,18
0,0579	24,57	18,60	22,61	-3,60	5,97	-2,86	21,95	11,05
0,0644	24,11	22,15	26,73	-7,15	1,96	-5,54	21,53	11,47
0,0694	23,38	26,92	32,14	-11,92	-3,54	-7,52	20,87	12,13



Φ	ETApol*(2_3)	ETApol*(4)	ETApol*(0')	PSIpol*(2_3)	PSIpol*(4)	PSIpol*(0')
0,0334	0,797	0,795	0,792	0,473	0,472	0,470
0,0444	0,916	0,886	0,878	0,470	0,455	0,451
0,0525	0,903	0,859	0,851	0,412	0,391	0,388
0,0579	0,896	0,853	0,840	0,370	0,353	0,347
0,0644	0,877	0,779	0,757	0,312	0,277	0,269
0,0694	0,820	0,574	0,531	0,237	0,166	0,153

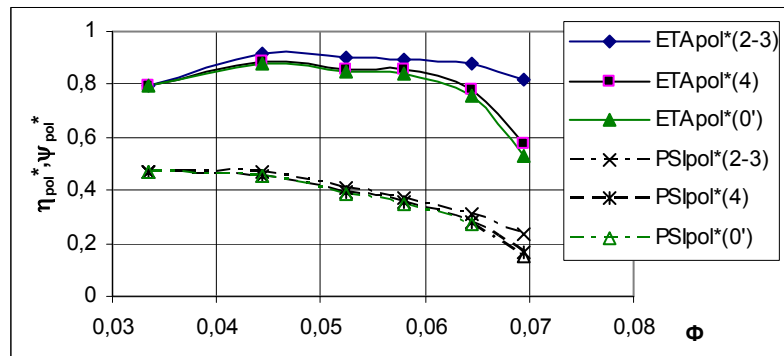


Рис.15 Аэродинамические характеристики (эксперимент KZ-1)

эксп-т	Му	$\Phi_{ср}$	α_3 ср, град	α_2 ср, град	α_3	z	$T_{ср}$, мс	обнар-ть, %	тип ступени
KZ-1	0,6	0,0334	10,87	13,36	0,2...0,3	2/1,5/3	112	75	РК+ЛД 395-21-1
KZ-2	0,8	<0,0403	<11,55	<14,19	0...0,2	0/1-2/0	77...270	20	РК+ЛД 395-21-1
KZ-3	0,6	0,0347	11,25	13,82	-0,15...0	-5...-4/0/0	115	60	РК+ЛД 395-21-1
KZ-4	0,6	0,0336	10,51	12,93	-0,35...0	1,5..2,5/0/0	99	95	РК(профилир.втулка)+ЛД 395-21-1
KZ-5	0,6	0,0384	10,9	15,57	0	0/0/1...2	104	50	РК 395-21-1+неп. элем. НЦ-16/76
NC-1	0,6	0,0448	10,43	14,29	0	0-1/0/0	107	85	РК+ЛД НЦ-16/76-1,44
NC-2	0,8	0,0498	10,38	14,22	0	+2...-4/0/0	98	55	РК+ЛД НЦ-16/76-1,44
NC-3	0,6	0,0437	9,78	13,42	0	0...1/0/0	107	100	РК+ЛД НЦ-16/76-1,44
NC-4	0,78	0,0488	9,79	13,43	0...0,2	0...1/0/0	92	35	РК("ромашка")+ЛД НЦ-16/76-1,44
RB-1	0,6	0,0481	17,33	13,54	0,035	(2&3)/(2&3)	172	90	РК+БЛД (баз. ст. КВиХТ)
RB-1	0,6	0,0322	10,76	9,68	0,06	(2&3)/(2&3)	180	70	РК+БЛД (баз. ст. КВиХТ)
RB-2	0,6	0,0484	15,21	11,85	0,036	(2&3)/(2&3)	172	85	РК+БЛД (баз. ст. КВиХТ)
RB-2	0,6	0,0317	9,47	8,51	0,056	2 / 2	110	80	РК+БЛД (баз. ст. КВиХТ)
RB-4	0,8	0,0619	19,10	17,26	0,03...0,04	2 / (0&2)	90	25	РК+БЛД (баз. ст. КВиХТ)
RB-4	0,8	0,0496	13,88	10,80	-0,034	-3,5 / -3,5	39	100	РК+БЛД (баз. ст. КВиХТ)
RB-4	0,8	0,0383	10,48	9,43	0,054	3 / 3	84	90	РК+БЛД (баз. ст. КВиХТ)

Табл.2 Сводка результатов работы системы диагностики предпомпажного состояния

в) Граница наступления срыва в ступени KZ более размыта, а в ступенях NC и RB более резкая, т.е. увеличение напорности ступени (и увеличение $\beta_{л2}$ с 22,5 до 32⁰) ведёт к лучшей обнаруживаемости срыва. Это подтверждает тенденцию, обнаруженную в ранее выполненных исследованиях.

г) Граница обнаружения срыва в рассмотренной ступени с БЛД более ранняя, чем в ступенях с ЛД, что также подтверждает результаты выполненных ранее А.А. Телевным и В. Г. Караджи исследований ступеней с “зауженными” диффузорами.

д) Уменьшение расхода после обнаружения вращающегося срыва незначительно ухудшает обнаруживаемость срыва.

е) Функционирование разработанной системы не подвержено ошибкам, появляющимся из-за больших погрешностей при определении расхода в компрессоре, требуемом для антипомпажных систем, основанных на параметрическом методе обнаружения (особенно на режимах малых расходов при невысоких числах Маха).

Также в этой главе исследованы причины и определены места образования вращающегося срыва.

В седьмой главе даны рекомендации по использованию системы диагностики предпомпажного состояния. Ложные срабатывания системы (отмеченные на режимах максимального расхода) устраняются путем увеличения пороговых значений уровней срабатывания. Уже отмечалось выше, что в системе принятия решения о близости режима к границе помпажа необходимо ввести (логическое) исключение таких срабатываний с использованием информации об измерении расхода, тем более, что погрешность измерения расхода при больших значениях производительностей минимальна. Для более точного диагностирования вращающегося срыва помимо пороговых значений уровней срабатывания необходимо вводить в систему обнаружения периоды автокорреляционных функций, соответствующие вращающемуся срыву в рассматриваемой проточной части.

Также даются рекомендации о размещении и типах датчиков, устанавливаемых в проточной части компрессора, приведена структурная схема системы диагностики.

Выводы. Проведено комплексное исследование функционирования системы диагностики предпомпажного состояния в типовых проточных частях с помощью современных вычислительных средств. На основе анализа и обобщения полученных результатов дана качественная и количественная оценка характерных признаков предпомпажного состояния в проточных частях с безлопаточным и лопаточными диффузорами. Разработана автоматическая система диагностики предпомпажного состояния, применимая практически для любого типа центробежных компрессоров.

Получены следующие научные и практические результаты:

1. С применением современного программно-вычислительного комплекса и специально разработанных и программно реализованных алгоритмов проведён анализ результатов экспериментального исследования нестационарных процессов в типовых ступенях центробежного компрессора

2. Разработан метод анализа нестационарных пульсаций давления и диагностирования предпомпажного состояния на основе признакового способа. В качестве характерного признака выбран вращающийся срыв – явление, непосредственно предшествующее помпажу и обладающее свойствами, позволяющими легко выявлять его на фоне других процессов.

3. На основе графического языка программирования Agilent VEE и интегрированной технической комплексной платформы MATLAB с использованием

специально разработанных алгоритмов обработки и представления данных с применением цифровых фильтров, синхронного накопления, корреляционного анализа и преобразования Гильберта обработаны нестационарные пульсации давления, полученные при испытаниях трех серий экспериментов типовых проточных частей центробежного компрессора с безлопаточным и лопаточными диффузорами.

4. Проведен анализ полученных данных с точки зрения достоверности определения источников возникновения срыва и наличия ложных срабатываний системы диагностики.

5. Полученные результаты сопоставлены с существующими моделями нестационарных процессов в центробежных компрессорах, в частности, выявлены основные источники и причины возникновения вращающегося срыва в центробежном компрессоре.

6. Разработана структурная схема и алгоритм работы макета системы диагностики предпомпажного состояния, программно реализованный в среде Agilent VEE - MATLAB.

Публикации по теме диссертации.

1. Измайлов Р.А., Акульшин Ю.Д., Ефремов С.Б., Крутиков Т.Е., Ширяев С.А. Диагностика помпажа центробежного компрессора на основе анализа физики нестационарных процессов // Труды пятого международного симпозиума “Потребители - производители компрессоров и компрессорного оборудования - 1999”. –СПб, 1999. -С.157-159.

2. Крутиков Т.Е, Александров А.В., Измайлов Р.А. Разработка системы диагностики помпажа в центробежном компрессоре на основе анализа физических явлений // Материалы межвузовской научной конференции XXVIII неделя науки СПбГТУ. – СПб. -2000. С.138

3. Александров А.В., Крутиков Т.Е., Юсипов Ш.А., Измайлов Р.А. Разработка системы антипомпажной защиты центробежного компрессора на основе диагностики и анализа нестационарных процессов // Материалы межвузовской научной конференции XXIX неделя науки СПбГТУ. –СПб. -2001. -С.52-54.

4. Измайлов Р.А., Акульшин Ю.Д., Александров А.В., Ефремов С.Б., Крутиков Т.Е., Юсипов Ш.А. Разработка системы диагностики помпажа центробежного компрессора на основе анализа физики нестационарных процессов // Тезисы докладов XII международной научно-технической конференции по компрессорной технике. -Казань, 2001. -С.121-123.