

УДК 621.51.226.2.53+621.431.75

РАННЯЯ ДИАГНОСТИКА ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ПРЕДПОМПАЖНЫХ РЕЖИМАХ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

© 2015 А. А. Хориков, С. Ю. Данилкин, Т. И. Мазикина

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Помпаж является опасным аэроупругим явлением, при возникновении которого в газовом тракте компрессора возникает ударная волна, повреждающая отдельные элементы компрессора, а также стендовые системы измерения параметров рабочего процесса. Поэтому ранняя диагностика предпомпажных состояний многоступенчатых осевых компрессоров современных авиационных двигателей, характеризующихся чрезвычайно высокой аэродинамической нагруженностью и малыми радиальными зазорами между ротором и статором, является актуальной задачей. В данной работе на основе анализа динамических процессов при дросселировании многоступенчатых компрессоров авиационных двигателей в стендовых условиях были выявлены диагностические признаки предпомпажного состояния компрессоров в сигналах с тензометров, установленных на лопатках, и в сигналах с датчиков пульсаций статического давления, установленных в корпусах компрессоров. Исследование выполнено с использованием современных методов обработки и анализа сигналов динамических процессов на основе быстрого преобразования Фурье и вейвлет-анализа с применением 3D представления результатов исследования. Результаты проведённого исследования указывают на возможность ранней диагностики помпажа, а также показывают, что при потере газодинамической устойчивости реализуется несколько форм осевых колебаний и соответствующих им акустических частот в зависимости от размеров присоединённых масс. Разработанные методы и средства предлагается применить при создании автоматизированных систем предупреждения помпажа для стендовых испытаний компрессоров при определении запасов газодинамической устойчивости.

Компрессор, предпомпажное состояние, стендовые испытания, спектральный анализ, газодинамическая устойчивость, пульсации потока, вибрационные напряжения.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-148-159

Введение

Осевые компрессоры современных авиационных двигателей характеризуются чрезвычайно высокой аэродинамической нагруженностью и малыми радиальными зазорами между ротором и статором. По этой причине исследование аэродинамических явлений при помпаже таких компрессоров, в отличие от низконапорных компрессоров (например [1, 2]), как правило, не производится, так как при возникновении помпажа в таких компрессорах из-за высокого уровня вибрационных нагрузок часто происходит касание роторных и статорных деталей, приводящее к их разрушению. Поэтому в эксплуатации, а также при стендовых испытаниях компрессоров авиационных двигателей, для определения запасов газодинамической устойчивости (ДКу ГДУ) обычно используется противопомпажная защита, которая позволяет в автоматическом режиме при возникновении помпажа путём резкого изменения сечения выходного

дросселя и (или) снижения частоты вращения компрессора обеспечить нахождение компрессора в режиме помпажа не более полупериода начального помпажного цикла. Однако даже в этом случае возникающая ударная акустическая волна вызывает высокие статические и динамические нагрузки в различных элементах компрессора и стендовых систем измерения параметров рабочего процесса. Поэтому своевременная ранняя диагностика предпомпажных состояний, которая позволит надёжно определить запасы газодинамической устойчивости компрессора без возникновения ударной волны, является актуальной задачей.

Одной из первых работ в этом направлении является исследование [3], где были получены дифференциальные уравнения для газодинамической устойчивости компрессоров, решение которых позволяло оценить частоту и амплитуду колебаний потока воздуха при помпаже в зависимости от свойств присоединённой

сети. В целом, эти подходы к оценке устойчивости близки понятиям теории Ляпунова [4], построенной на концепции устойчивости бесконечно малых отклонений, отсутствия возмущающих сил, бесконечного интервала времени, тогда как в рассматриваемой здесь задаче отклонения конечны, а возмущающие силы присутствуют на конечном интервале времени. Поэтому рассматриваемая здесь задача установления предпомпажного состояния компрессора более близка к понятию технической устойчивости и неустойчивости [5] с использованием методов спектрального анализа.

Для обеспечения устойчивости к помпажу простых компрессорных систем обычно достаточно, чтобы наклон мгновенной характеристики компрессора имел отрицательное значение [3]. В системах с высоконапорными многоступенчатыми компрессорами процессы гораздо сложнее. В настоящей работе на базе анализа экспериментальных исследований двух высоконапорных вентиляторов предлагаются новые способы безаварийного определения запасов ГДУ, основанные не на парировании уже начавшегося помпажа, а на определении предпомпажного состояния компрессоров с использованием современных методов и средств регистрации и обработки динамических сигналов.

Для определения момента возникновения предпомпажного состояния используется вейвлет-анализ сигналов с тензодатчиков на лопатках и с датчиков пульсаций статического давления над рабочим колесом. Согласно вейвлет-преобразованию динамический сигнал $f(t)$ разлагается по ортонормированному базису [6]:

$$f(t) = \sum_k s_{j,k} \varphi_{j,k}(t) + \sum_{k,j \leq J} d_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad (1)$$

где $\varphi_{j,k}(t)$ и $\psi_{j,k}(t)$ – базисные функции, полученные с помощью растяжения и сдвига скейлинг-функции и вейвлет-функции соответственно:

$$\begin{aligned} \psi_{j,k}(t) &= 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), \\ \varphi_{j,k}(t) &= 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k), \end{aligned} \quad (2)$$

а коэффициенты $s_{j,k}$ и $d_{j,k}$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} s_{j,k} &= \int f(t) \varphi_{j,k}(t) dt, \\ d_{j,k} &= \int f(t) \psi_{j,k}(t) dt. \end{aligned} \quad (3)$$

При реализации вейвлет-анализа определялись вейвлет-коэффициенты $d_{j,k}$ и их дисперсия. Дисперсия вейвлет-коэффициентов определялась стандартным образом:

$$D_n^2(L, N) = \frac{1}{N} \left(\sum_{k=0}^{N-1} (d_{k+n}^L)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{k=0}^{N-1} d_{k+n}^L \right)^2 \right),$$

где N – ширина окна, по которому вычисляется дисперсия.

Результаты и анализ проведённых исследований

Первый из исследованных вентиляторов состоял из трёх ступеней с консольными рабочими лопатками без входного направляющего аппарата (ВНА). Степень повышения давления в этом трёхступенчатом вентиляторе составляла $\pi_{\kappa}^* = 3,4$. Для исследования динамических процессов вентилятор был препарирован датчиками пульсаций и тензодатчиками. Граница возникновения помпажа была определена во всём диапазоне частот вращения. В качестве примера на рис. 1-5 представлены результаты анализа динамических сигналов в процессе дросселирования при приведённой частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,95$, где запас газодинамической устойчивости компрессора от предполагаемой линии рабочих режимов составил $\Delta Ky = 7,7\%$ (рис. 1, а). Визуальное наблюдение за сигналами с датчиков пульсаций, помещённых за вентилятором, и с тензодатчиков, помещённых на лопатках, не позволяло в темпе эксперимента выявить заметного изменения их суммарного уровня вплоть до границы помпажа, чему соответствует время $t = 32,6$ с (рис. 1, б). Но можно отметить некоторое возрастание суммарного уровня пульсаций, начиная с $\Delta Ky = 7,5\%$. Спектральный анализ пульсаций методом Фурье при $\Delta Ky = 7,4\%$ ($t = 20$ с) не позволяет выделить

какие-либо спектральные составляющие, по которым можно было бы диагностировать начало помпажа (рис. 1, з). При $\Delta K_y = 7,45\%$ в спектре пульсаций из шума выделилась частота $f = 35$ Гц, однако причислить её однозначно к помпажной частоте не представляется возможным из-за незначительной амплитуды. И только начиная с $\Delta K_y = 7,5\%$, по спектру пульсаций можно уверенно констатировать наличие диагностических частот помпажа $f = 35$ Гц и $f = 70$ Гц. При $\Delta K_y = 7,6\%$ диагностические частоты стали равны $f = 36$ Гц и $f = 72$ Гц соответственно. По тензодат-

чикам, помещённым на лопатках, заметить изменение суммарного уровня сигнала в процессе дросселирования также не представляется возможным вплоть до $t = 32,6$ с (рис. 2). Но в спектрах пульсаций, начиная с $\Delta K_y = 7,45\%$, т.е. за $\Delta K_y = 0,25\%$ до помпажа, можно уже выделить спектральную составляющую $f = 36$ Гц, которая является предвестником помпажа (рис. 1, в). Поскольку частоты одинаковы для вращающихся и невращающихся деталей, то это означает, что поток колеблется в осевом направлении.

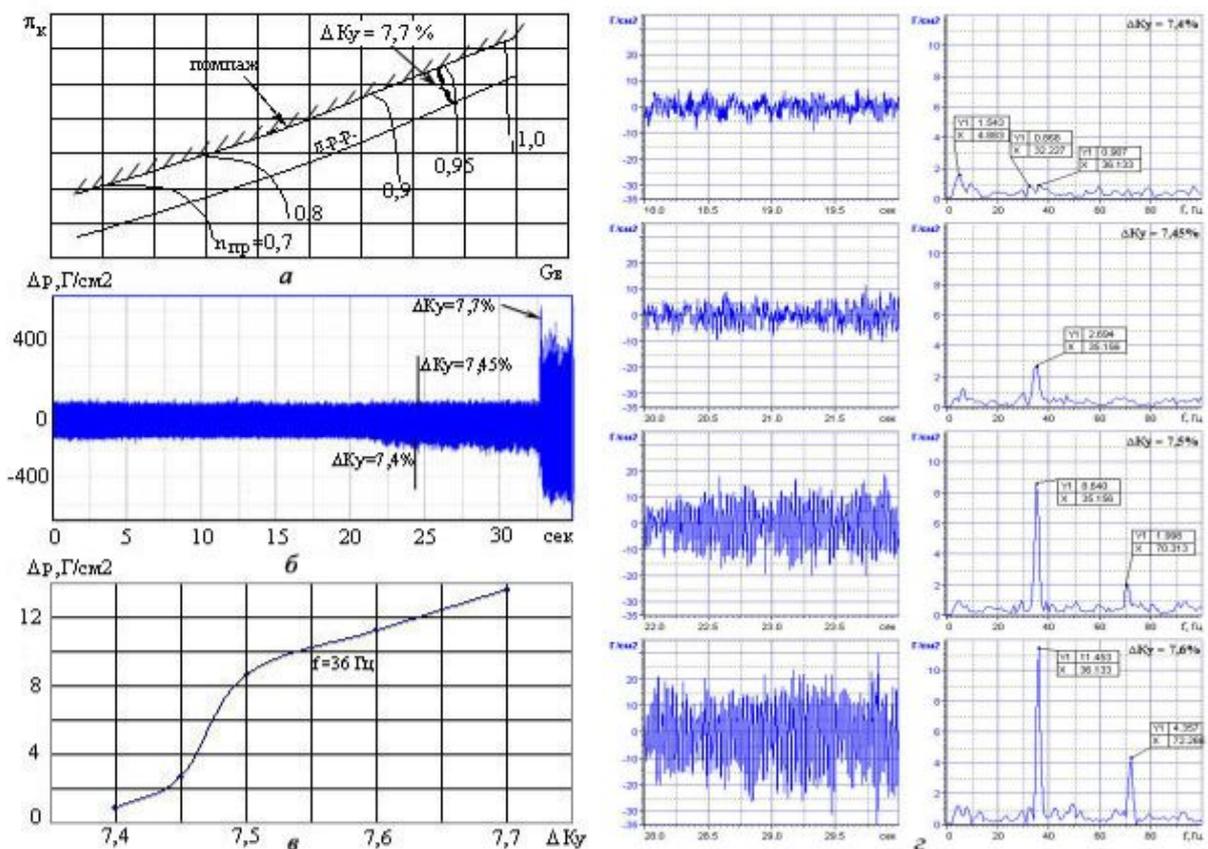


Рис. 1. Изменение амплитудных и спектральных характеристик пульсаций давления в процессе дросселирования трёхступенчатого вентилятора до помпажа при $\bar{\eta}_{пр} = 0,95$: а – граница помпажа и линии рабочих режимов на поле напорных характеристик; б – осциллограмма пульсаций; в – изменение спектральной составляющей с $f = 36$ Гц в процессе дросселирования; г – осциллограммы и спектры пульсаций в процессе дросселирования

При использовании вейвлет-анализа с учётом частоты дискретизации и частотного состава сигнала с тензодатчика для исследования были выбраны уровни $L = 8$ (частотный диапазон от 72 Гц до 144 Гц), $L = 9$ (частотный диапазон от 36 Гц до 72 Гц), $L = 10$ (частотный диапазон от 18 Гц до 36 Гц), $L = 11$ (частотный диа-

пазон от 9 Гц до 18 Гц). По результатам вычисления дисперсии вейвлет-коэффициентов на 8, 9, 10 и 11 уровнях, представленным на рис. 3, видно, что рост дисперсии на 9 и 10 уровне начинает происходить на 22-й секунде, а для остальных уровней рост наблюдается только по времени помпажа.

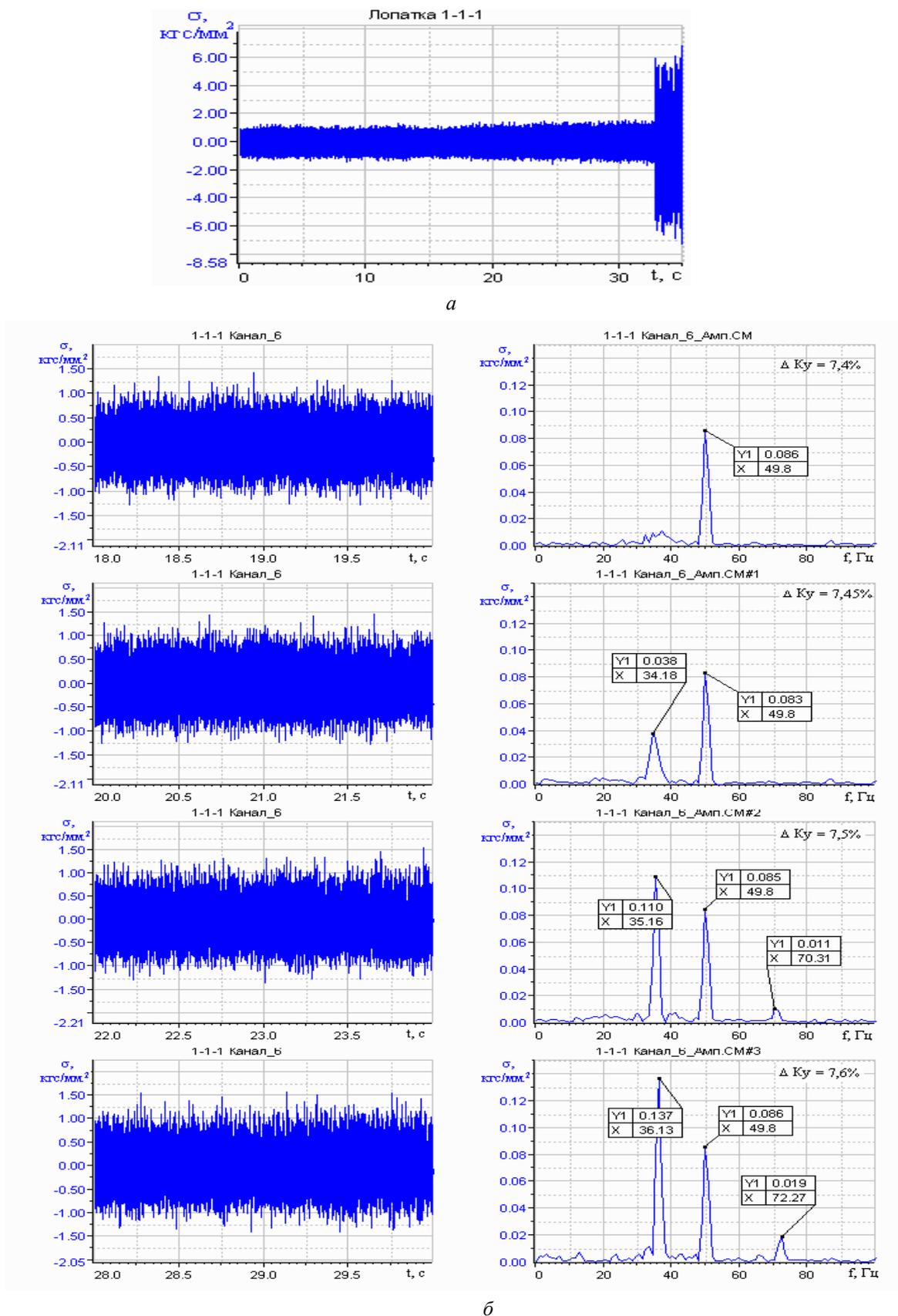


Рис. 2. Изменение тензосигнала с рабочей лопатки при дросселировании вентилятора при $\bar{n}_{np} = 0,95$:
а – изменение суммарного сигнала; б – изменение спектра

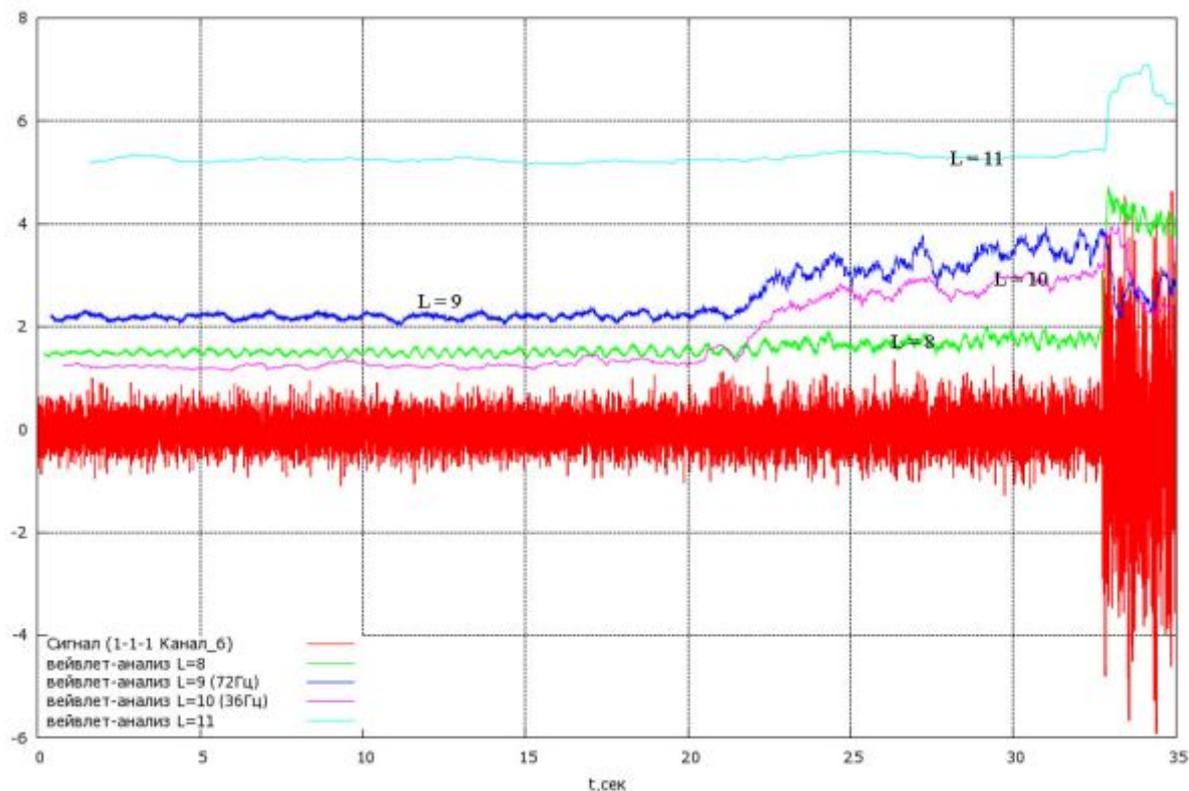


Рис. 3. Дисперсия вейвлет-коэффициентов на 8, 9, 10 и 11 уровнях преобразования сигналов с тензометра перед помпажом

Для того, чтобы подчеркнуть, что введённая характеристика адекватно отражает изменение в спектре сигнала, на рис. 4 приведены для сравнения коэффициенты оконного преобразования Фурье, соответствующие частотам 36 и 72 Гц. Видно, что частота 36 Гц возникает несколько раньше, чем частота 72 Гц (хотя в случае вейвлетов они детектируются практически одновременно). Для Фурье коэффициентов эта разница по времени несколько больше, что связано, в том числе, с большой шириной окна (изменения в амплитуде частоты 72 Гц детектируются позже). Сказывается преимущество вейвлетов, в случае которых ширина окна автоматически подстраивается под измеряемую частоту. Также следует подчеркнуть, что число компьютерных операций, необходимых для получения вейвлет-коэффициентов, почти на порядок мень-

ше, чем в случае оконного Фурье преобразования с аналогичными шагом и шириной окна.

Сравнение с показаниями датчика пульсации (рис. 5) обнаруживает аналогичную картину. Амплитуда дисперсии для пульсаций уменьшена на рис. 5 в 80 раз, чтобы привести всё к единому масштабу, поскольку значение имеют лишь относительные изменения амплитуды.

Таким образом, в данном случае анализ сигналов с помощью вейвлет-преобразования позволил выявить диагностические частоты помпажа вентилятора на 1,5 с раньше, чем методом Фурье. При этом результаты диагностики одинаковы как по сигналам с неподвижных датчиков пульсаций, помещённых на корпусе, так и с тензодатчиков, помещённых на вращающихся рабочих лопатках.

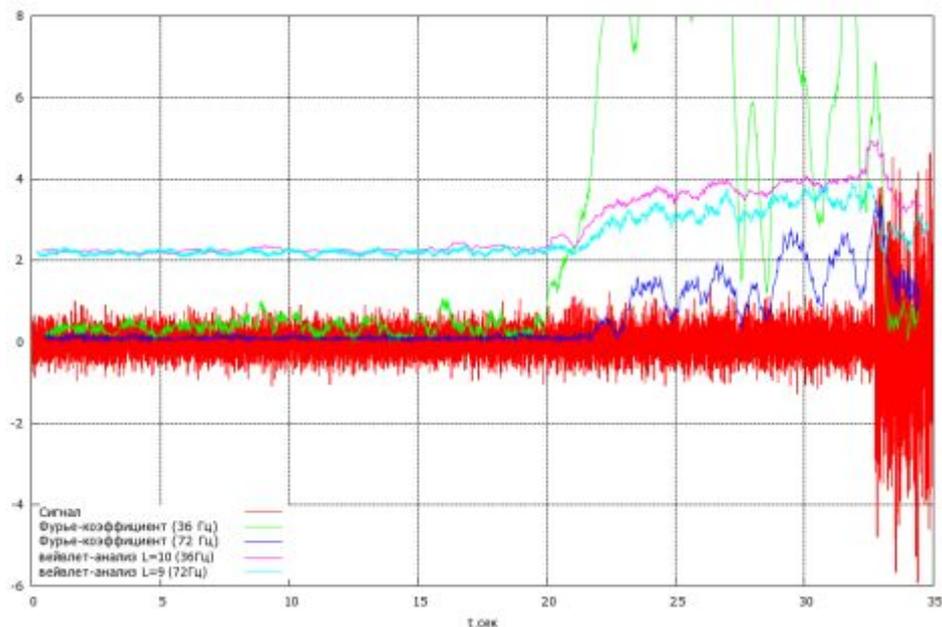


Рис. 4. Дисперсия вейвлет-коэффициентов на 9, 10 уровнях преобразования и коэффициенты оконного преобразования Фурье для частот 36 и 72Гц

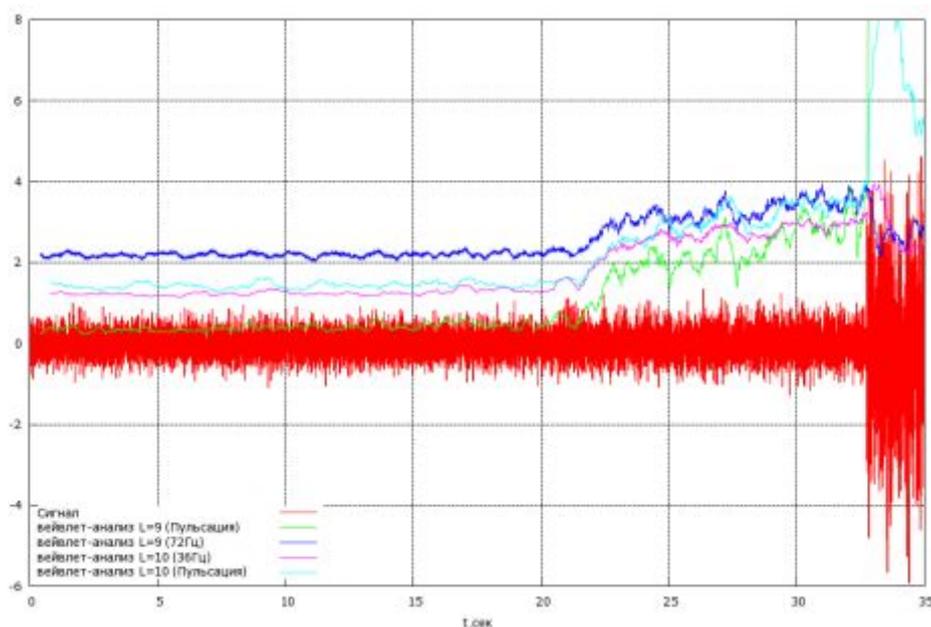


Рис. 5. Дисперсия вейвлет-коэффициентов на 9, 10 уровнях преобразования и для пульсаций давления

На рис. 6 представлены изменения огибающей плотности вероятности сигналов с датчиков пульсаций и с датчиков вибраций в процессе дросселирования при фильтрации сигнала $\Delta f = 30 \dots 45$ Гц, из которых видно, что при $\Delta K_y = 7,4\%$ огибающие плотности вероятности имеют колоколообразную форму, что характерно для случайного процесса. Начиная с

$\Delta K_y = 7,5\%$, графики плотности вероятности имеют чашеобразную форму, свойственную гармоническому процессу [7], который свидетельствует о предпомпажном состоянии этого трёхступенчатого вентилятора за $\Delta K_y = 0,2\%$ до наступления помпажа, что при данных испытаниях соответствовало интервалу времени $\Delta t \approx 10$ с.

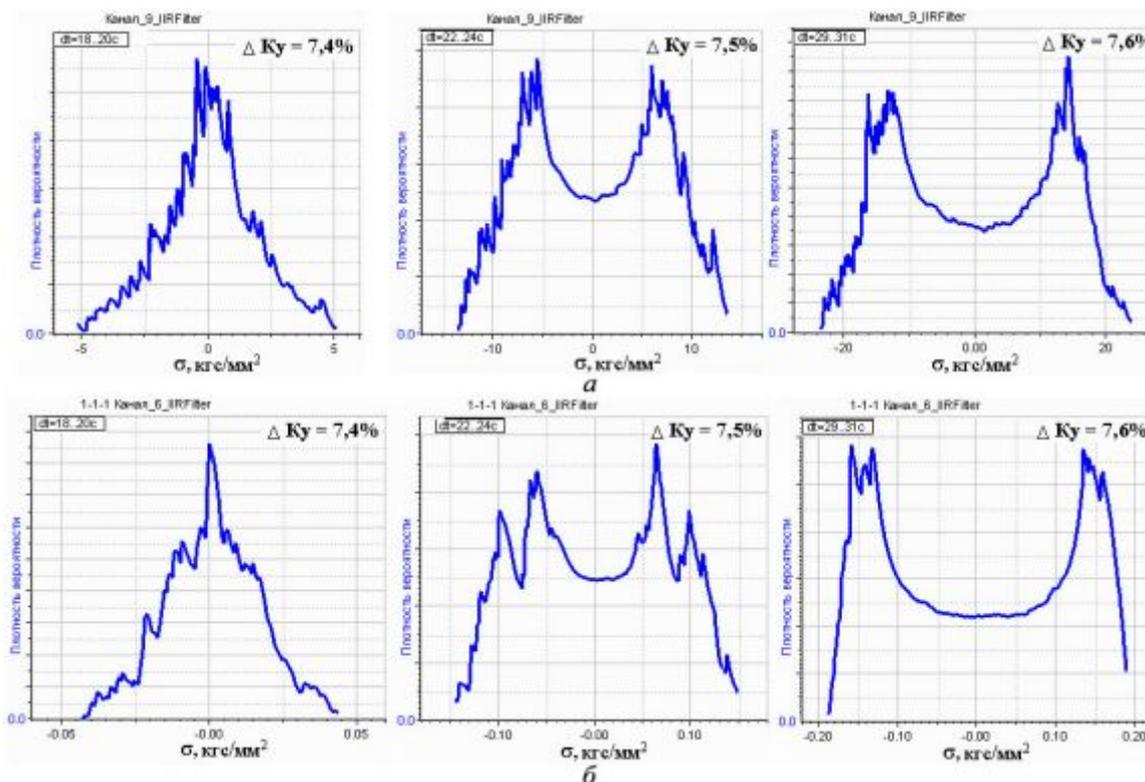


Рис. 6. Изменение огибающих плотности вероятности динамических сигналов, отфильтрованных в диапазоне $\Delta f = 30 \dots 45$ Гц при дросселировании:
 а – сигналы с датчика пульсаций; б – сигналы с тензодатчика на лопатке

Дальнейшие исследования были проведены на четырёхступенчатом вентиляторе с ВНА, причём рабочие лопатки первых трёх ступеней были выполнены с бандажированными полками. Степень повышения давления в этом вентиляторе составляла $\pi^*_k = 4,1$. Так же, как и предыдущий, данный вентилятор был подробно препарирован датчиками пульсаций и тен-

зометрами для исследования динамических процессов. На рис. 7 представлено изменение ΔK_y в процессе дросселирования при частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,95$, где при $\Delta K_y = 9,1\%$ от предполагаемой линии рабочих режимов произошёл помпаж, начиная с момента времени $t = 480$ с.

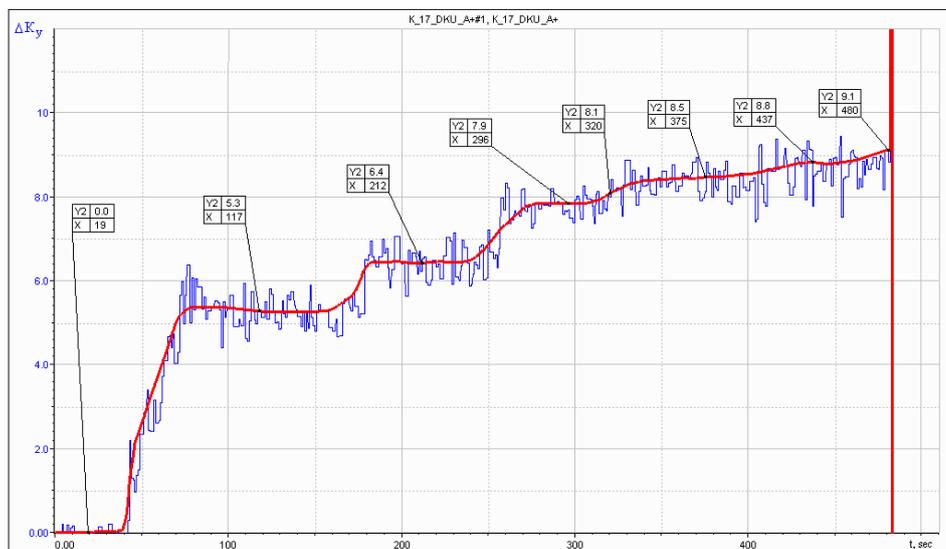


Рис. 7. Изменение ΔK_y в процессе дросселирования при $\bar{n}_{np} = 0,95$

Как видно из рис. 8, а, при $\Delta K_y = 7,9\%$ огибающая плотности вероятности сигнала с датчика пульсаций над первым рабочим колесом в диапазоне $\Delta f = 15...30$ Гц имеет вид колокола, что свойственно случайному процессу. При $\Delta K_y \geq 8,8\%$ огибающая плотности вероятности этого сигнала имеет чашеобразную форму, что свойственно гармоническому процессу. Аналогичная картина поведения огибающей плотности вероятности пульсаций имеет место при частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,7$ в диапазоне частот $\Delta f = 6...14$ Гц (рис. 8, б).

3D спектр пульсаций на рис. 9 позволяет констатировать, что диагностическая частота пульсаций $f = 21,4$ Гц отчётливо проявилась уже при $t = 420$ с, т.е. за $\Delta t = 60$ с или за $\Delta K_y = 0,4\%$ до наступления помпажа, а первые признаки потери газодинамической устойчивости начина-

ют проявляться уже при $t = 320$ с, при $\Delta K_y = 8,1\%$, т.е. за $\Delta K_y = 1\%$ до наступления помпажа.

Вейвлет-анализ пульсаций потока, выполненный по программе [8], позволяет дать самые объективные оценки частотных характеристик начала помпажа, а именно при наступлении помпажа при $t = 479,7$ с наиболее сильные пульсации потока реализуются с частотами $f = 6; 9,5$ и 22 Гц (рис. 10).

Из рис. 11 также отчётливо видно, что при частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,8$ помпажные частоты пульсации потока $f \approx 9, 18$ и $25,5$ Гц также начинают проявляться задолго ($\Delta t \approx 70$ с) до наступления помпажа, а за $\Delta t \approx 25$ с эти частоты соответствуют ярко выраженным гармоническим колебаниям потока.

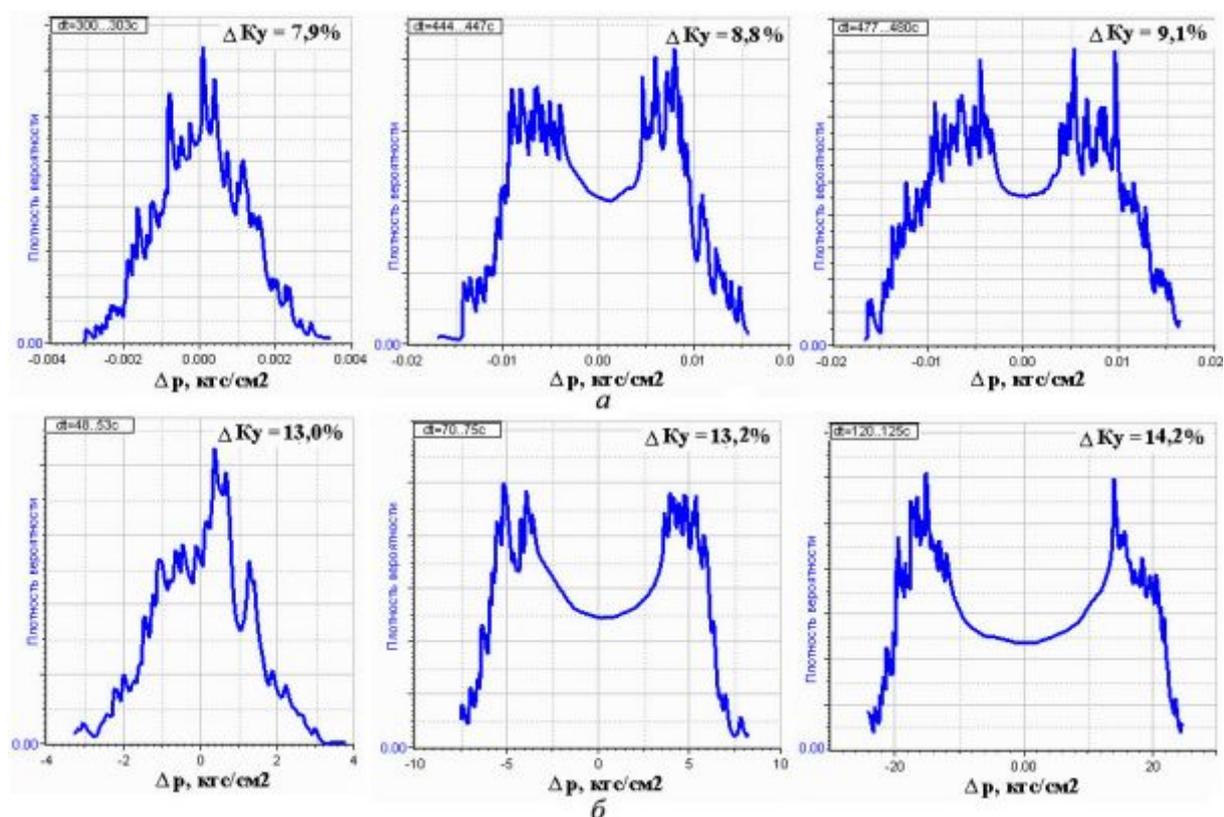


Рис. 8. Изменение огибающей плотности вероятности:
 а – над РК-1 в диапазоне частот $\Delta f = 15...30$ Гц, $\bar{n}_{np} = 0,95$;
 б – на входе в вентилятор в диапазоне частот $\Delta f = 6...14$ Гц, $\bar{n}_{np} = 0,7$

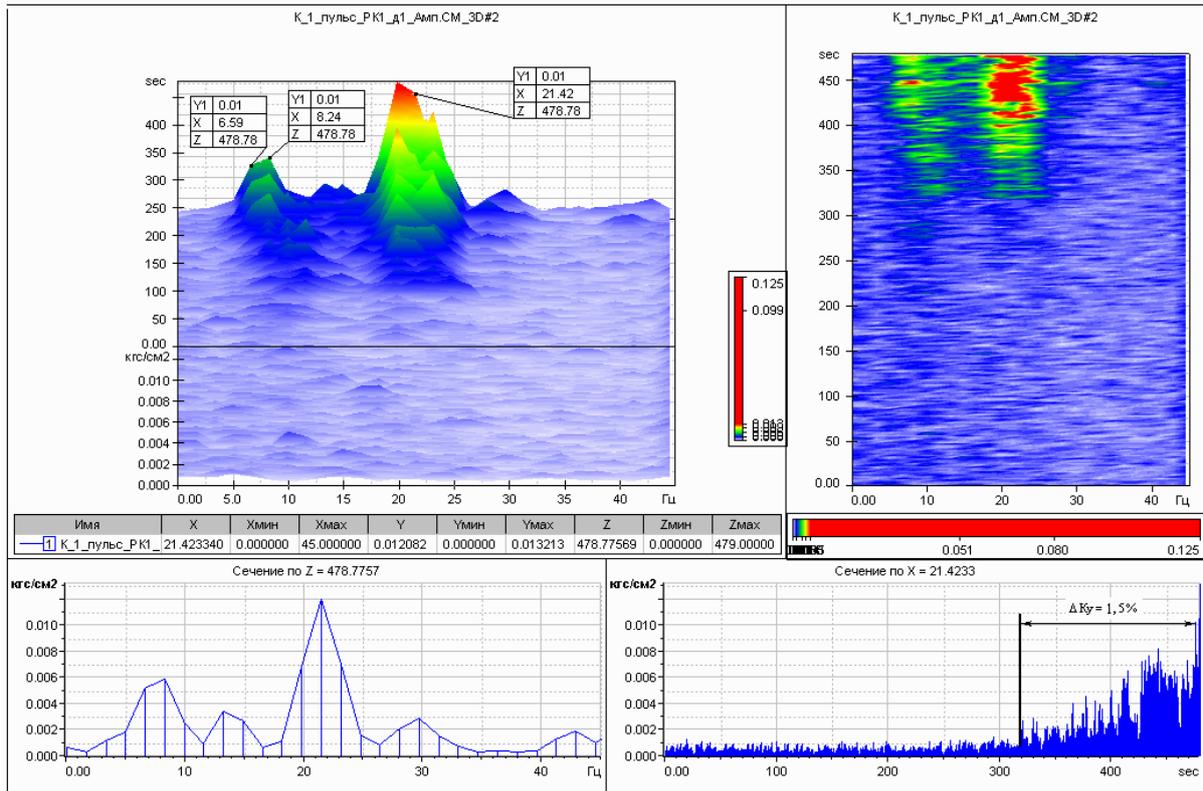


Рис. 9. 3D спектр пульсаций потока над РК-1 при $\bar{n}_{пр} = 0,95$

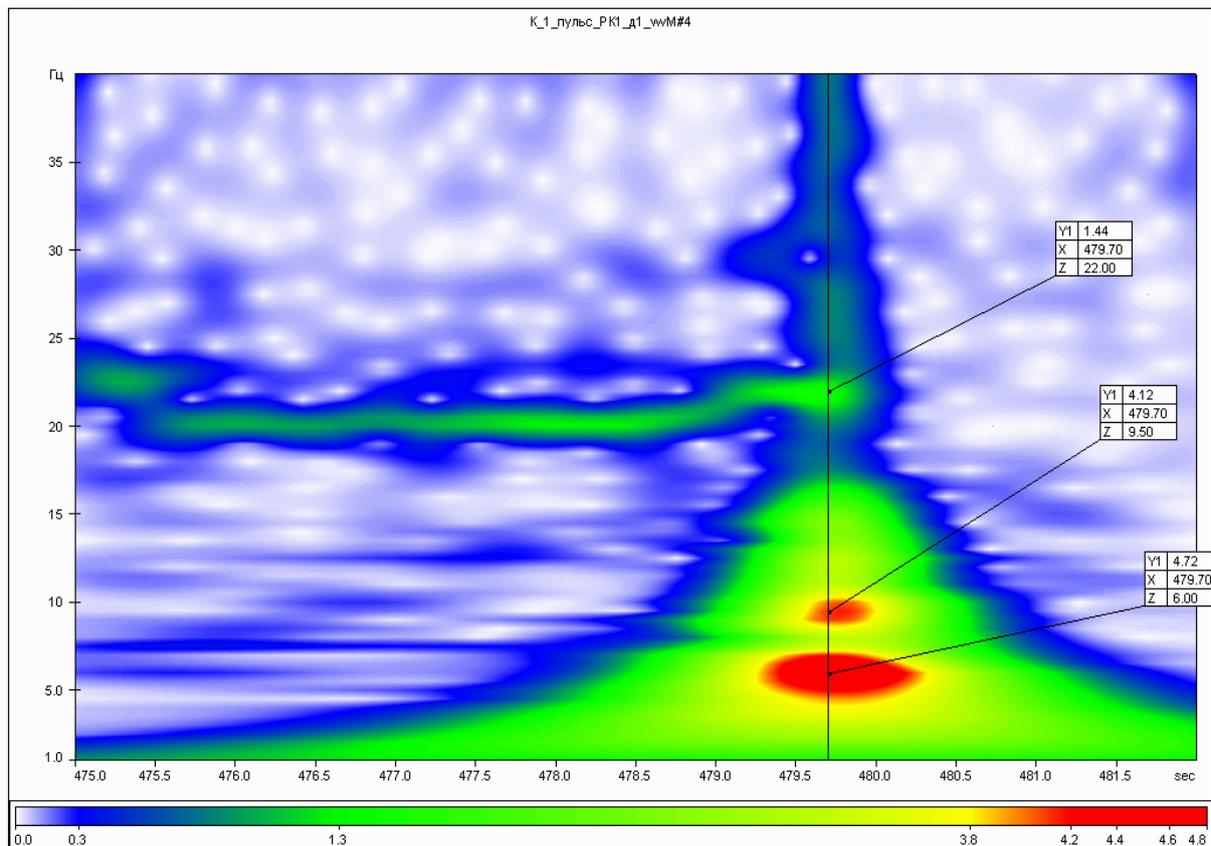


Рис. 10. Вейвлет-анализ пульсаций потока над РК-1 при $\bar{n}_{пр} = 0,95$

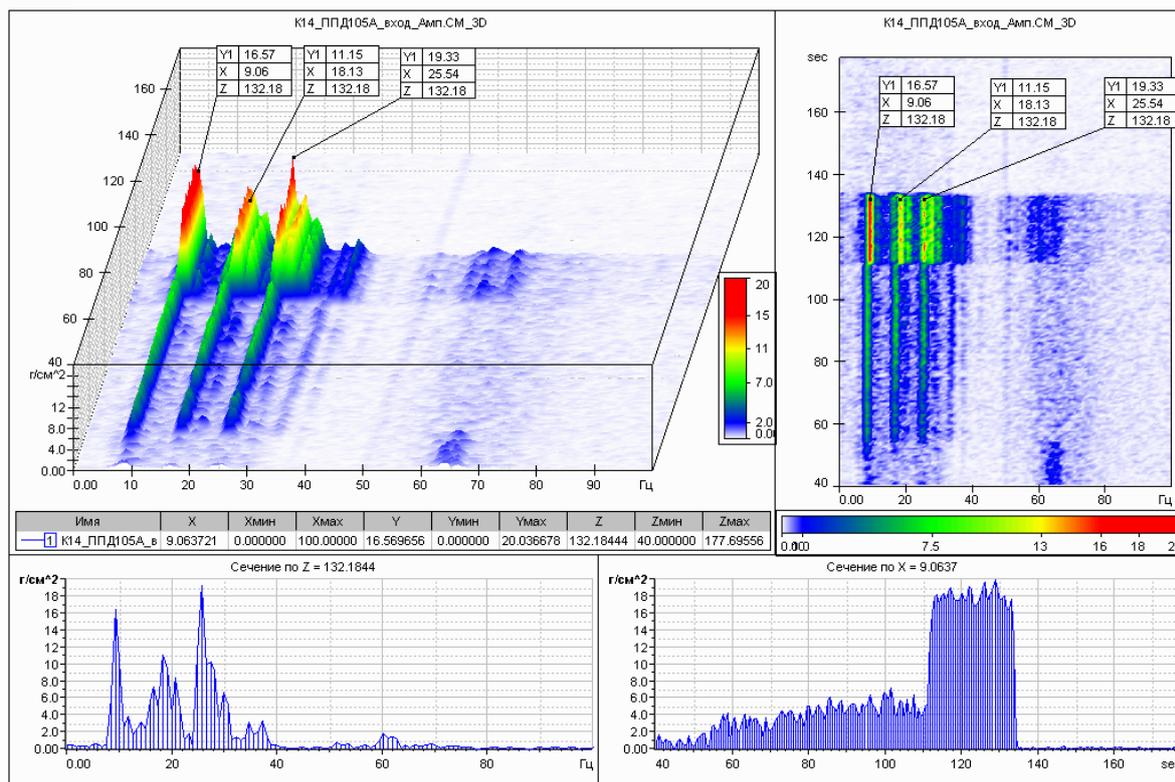


Рис. 11. 3D спектр пульсаций потока на входе в вентилятор при $\bar{n}_{пр} = 0,8$

Заключение

Проведённый анализ динамических процессов при определении запасов газодинамической устойчивости в многоступенчатых высоконагруженных компрессорах позволил выявить диагностические признаки (предвестники) помпажа, который является опасным аэроупругим явлением и при возникновении которого по тракту компрессора возникает ударная воздушная волна, повреждающая отдельные элементы компрессора, а также стендовые системы измерения параметров рабочего процесса. Эти диагностические признаки можно обнаружить современными методами анализа динамических сигналов с датчиков пульсаций и с тензодатчиков на лопатках до наступления помпажа. К таким методам следует отне-

сти 3D спектральный анализ, вейвлет-анализ и построение огибающей плотности вероятности сигналов.

Приведённые примеры при испытаниях вентиляторов на газодинамическую устойчивость указывают на возможность такой ранней диагностики помпажа за время $\Delta t = 10...320$ с или за $\Delta K_y = 0,25...1,5\%$ до границы помпажа в зависимости от темпа дросселирования.

Проведённое исследование также показало, что при потере газодинамической устойчивости реализуется несколько форм осевых колебаний и соответствующих им акустических частот в зависимости от размеров присоединённых масс для двух рассмотренных случаев. Но все эти формы и частоты можно выявить до наступления полномасштабного помпажа.

Библиографический список

1. Колесинский Л.Д., Макашева О.В. Анализ протекания нестационарных явлений в многоступенчатом осевом компрессоре, работающем в системе стенда, при

помпаже // Учёные записки ЦАГИ. 2008. Т. XXXIX, № 4. С. 46-59.

2. Мохаммадсадеги, Чумаченко Д.Л., Чигрин В.С. Экспериментальное исследование неустойчивых режимов работы

компрессора ГТД // Газотурбинные технологии. 2014. №8. С. 42-47.

3. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах. М.: Машиностроение. 1974. 263 с.

4. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. М.: ГТТИ, 1935. 464 с.

5. Моисеев Н.Д. О некоторых методах теории технической устойчивости. Ч. 1 // Труды Военно-воздушной академии им. профессора Н.Е. Жуковского. 1945. Вып. 135. 26 с.

6. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 5. С. 465-501.

doi:10.3367/UFN.0171.200105a.0465

7. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 310 с.

8. WinПос – Пакет обработки сигналов. Руководство пользователя, редакция 3.2, БЛИЖ, 409801.002-04 90. Мытищи: НПП «Мера», 2014. 184 с.

Информация об авторах

Хориков Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: khorikov@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, расчётно-экспериментальные исследования.

Данилкин Сергей Юрьевич, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения имени

П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, цифровая обработка сигналов.

Мазикина Татьяна Ивановна, ведущий конструктор, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: dep200@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, цифровая обработка сигналов.

EARLY DETECTION OF VIBRATION BEHAVIOUR OF AIRCRAFT ENGINE MULTISTAGE AXIAL COMPRESSOR IN PRE-SURGE STATES DURING RIG TESTING

© 2015 A. A. Khorikov, S. Y. Danilkin, T. I. Mazikina

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov,
Moscow, Russian Federation

Surge is a dangerous aero-elastic phenomenon. When surge occurs a shock wave originates in the gas path of the compressor, which damages individual elements of the compressor, as well as the test beds for measuring the parameters of the workflow. Therefore, early diagnostics of pre-surge states of multistage axial compressors of modern aircraft engines characterized by extremely high aerodynamic loading and small radial clearances between the rotor and the stator is an urgent task. The paper presents the results of the analysis of dynamic processes that take place during throttling of aircraft engine multistage compressors in test bed conditions. Diagnostic features of the pre-surge state of the compressor were revealed in the signals from strain gauges mounted on the blades, and the signals from sensors of static pressure pulsations installed in the compressor housing. The research was carried out using up-to-date methods of processing and analysis of the signals of dynamic processes based on the fast Fourier transform and wavelet analysis using a 3D representation of the results of the study. The results of the study indicate the possibility of early diagnosis of surge, and also show that several forms of axial vibrations and their respective acoustic frequencies depending on the size of connected masses may occur in the case of loss of gas dynamic stability. The developed methods and means are proposed to be used for the creation of automated systems for preventing surge in compressor rig testing to determine the gas dynamic stability margin.

Compressor, pre-surge condition, spectral analysis, gas dynamic stability, flow pulsations, vibratory stresses.

References

1. Kolesinsky L.D., Makasheva O.V. Analysis of unsteady flow phenomena in a multi-stage axial compressor is running in the stand, with the surge. *TsAGI Science Journal*. 2008. V. XXXIX, No 4. P. 46-59. (In Russ.)
2. Mohammadsadegi, Chumachenko D.L., Chigrin V.S. Experimental study of unstable modes of the compressor GTE. *Gas turbo technology*. 2014. No. 8. P. 42-47. (In Russ.)
3. Kazakevitch V.V. *Avtokolebaniya (pompazh) v kompressorakh* [Self-oscillations (surge) in compressors]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1974. 263 p.
4. Lyapunov A.M. *Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya* [The general problem of motion stability]. Moscow: GTTI Publ., 1935. 464 p.
5. Moiseev N.D. Some methods of the theory of technical stability. Part 1. *Works VVAKA*. 1945. Issue 135. P. 26. (In Russ.)
6. Dremin I.M., Ivanov O.V., Nechitailo V.A. Wavelets and their uses. *Physics-Uspokhi*. 2001. V. 44, no. 5. P. 447-478. doi.org/10.1070/pu2001v044n05abeh000918
7. Bendat J., Peirsol A. *Primeneniya korrelyatsionnogo i spektral'nogo analiza* [Applications of correlation and spectral analysis]. Moscow: Mir Publ., 1983. 310 p.
8. WinPos signal processing package. User Manual, Revision 3.2, BLIG, 409801.002-04 90. Mytishi: NPP «MERA» Publ., 2014. 184 p.

About the authors

Khorikov Anatoliy Alekseevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: khorikov@rtc.ciam.ru. Area of Research: strength, dynamics, calculation and experimental researches.

Danilkin Sergey Yurievich, Division Head, Central Institute of Aviation Motors

named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Area of Research: strength, dynamics, digital signal processing.

Mazikina Tatiana Ivanovna, Project Design Leader, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: dep200@rtc.ciam.ru. Area of Research: strength, dynamics, digital signal processing.