

УДК 621.45.01

А.А. ФИЛОНЕНКО<sup>1</sup>, В.Ю. БЕРЕЖНОЙ<sup>1</sup>, О.Д. ДЕГТЯРЁВ<sup>2</sup>, М.М. КУДИН<sup>2</sup><sup>1</sup>ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА ПОВЫШЕННЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ВХОДЕ В КАМЕРУ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

С применением комбинации Wavelet-анализа и спектрального анализа сигналов малоинерционных датчиков давления и акселерометров, установленных на наружном корпусе двигателя, определен источник повышенных пульсаций давления на входе в камеру сгорания приводного газотурбинного двигателя мощностью 10 МВт.

газотурбинный двигатель, малоинерционный датчик давления, акселерометр, Wavelet-анализ, спектральный анализ, вращающийся срыв

### Введение

При газодинамической доводке газотурбинных двигателей (ГТД) специалисты часто сталкиваются с проблемой неустойчивой работы компрессора. Отклонение положения границы устойчивых режимов работы компрессора (ГУР) от ожидаемого приводит к возникновению помпажа или вращающегося срыва при разгоне и сбросе оборотов. Даже если такое явление и не приводит к разрушению конструкции, оно затягивает выход двигателя на рабочий режим и ухудшает условия работы камеры сгорания.

Распространенным способом предотвращения неустойчивых режимов работы компрессора при разгоне и сбросе оборотов двигателя служит установка клапанов перепуска воздуха (КПВ) над компрессором. Это относительно недорогое конструктивное мероприятие может само вызывать неустойчивые режимы работы, особенно когда применяется в многовальном двигателе.

**Формулирование проблемы.** При доводке двигателя ГТД 10000, выпускаемого НПП «Зоря-Машпроект» (г. Николаев) были отмечены недостаточные запасы газодинамической устойчивости компрессора низкого давления (КНД). Для предотвращения неустойчивых режимов работы КНД установили два КПВ за его 6-й ступенью и четыре

КПВ на переходнике между ним и компрессором высокого давления (КВД) [1]. Однако как при разгоне так и при сбросе оборотов повышенные уровни пульсаций давления при открытых КПВ сохранились (рис. 1).

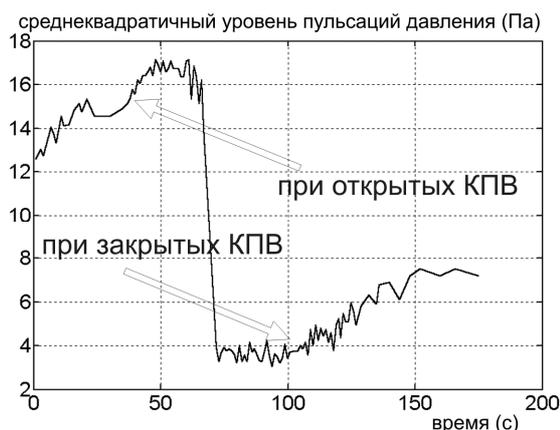


Рис. 1. Уровень пульсаций давления на входе в камеру сгорания при разгоне двигателя

Задача исследования состояла в определении источника повышенных пульсаций.

### Решение проблемы

Поиск источника повышенных пульсаций было решено произвести путем анализа записей нестационарного давления и вибраций на наружных стенках статора двигателя. Это удобное место установки датчиков на двигателе часто используется для изучения характера течения в компрессоре [2].

Схема установки малоинерционных датчиков давления и акселерометров представлена на рис. 2.

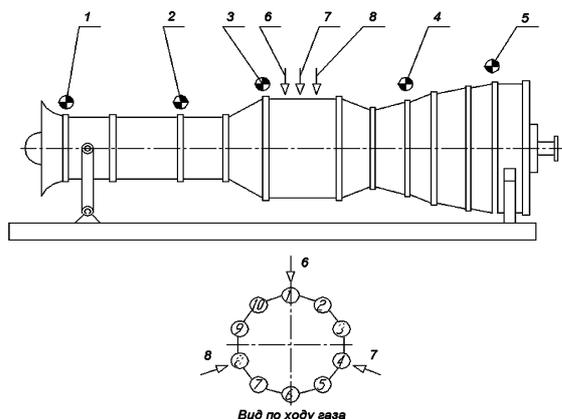


Рис. 2. Схема установки датчиков на двигателе

Измерительные каналы датчиков давления (рис. 2, 6, 7, 8) МТРП (мембранный тензорезисторный преобразователь) имели полосу пропускания 0-1200Гц, а пьезоэлектрические акселерометры МВ-04 (рис. 2, 1 – 5) – 0 – 5000 Гц.

Измерительно-вычислительная система, разработанная НПП «Мера» (г. Королев, Россия) по заданному алгоритму производила запись и предварительную обработку сигналов датчиков в реальном времени в процессе разгона и сброса оборотов двигателя с частотой дискретизации 2048 Гц.

Так как записанные сигналы представляли нестационарные, переходные процессы, к ним был применен дискретный и непрерывный Wavelet-анализ для поиска особенностей их протекания.

Результаты непрерывного Wavelet-преобразования фрагмента сигнала датчика давления № 6 в момент закрытия КПВ представлены на рис. 3.

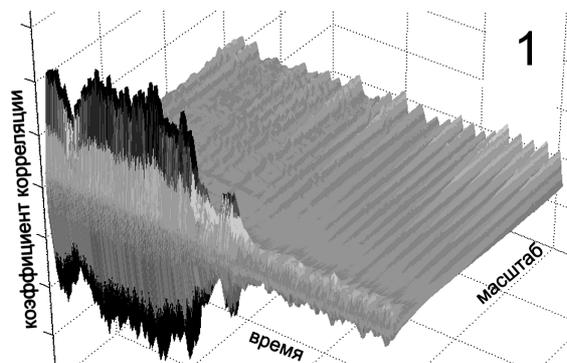


Рис. 3. Непрерывное Wavelet-преобразование участка сигнала при закрытии КПВ

Здесь термин масштаб (scale) соответствует степени сжатия Wavelet-функции во времени (использованы 64 уровня масштаба), а коэффициент корреляции определяется между Wavelet-функцией определенного масштаба и сигналом при непрерывном сдвиге (shift) этой функции во времени.

Из рисунка видно, что сильные пульсации имеют мелкий масштаб – колебания происходят в узкой полосе относительно высоких частот.

Детали декомпозиции сигнала датчика давления № 6, находящиеся в этой узкой полосе частот представлены на рис. 4. Применена функция, предложенная Meyer [3], подходящая для анализа пульсаций давления воздушного потока. С ее помощью выполнена декомпозиция для 7-ми уровней масштаба с использованием дискретного Wavelet-преобразования. Только детали второго, третьего и четвертого уровней масштаба имели неслучайный характер

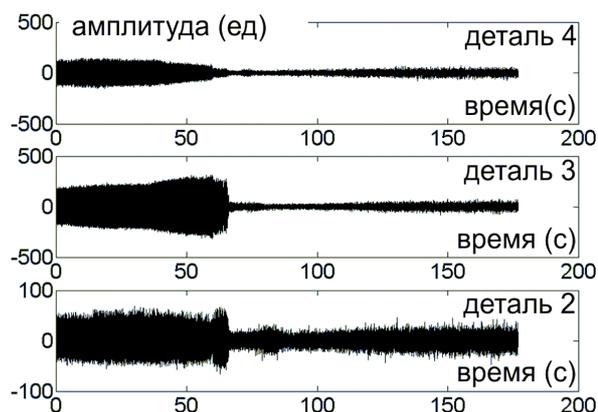


Рис. 4. Фрагмент дискретной Wavelet-декомпозиции сигнала датчика давления

Из рисунка видно, что при открытых КПВ амплитуда пульсаций велика, а частота увеличивается с ростом частоты вращения роторов сначала плавно а затем скачкообразно. При закрытии КПВ, амплитуда пульсаций существенно уменьшается.

По результатам Wavelet-анализа сигнал был разбит на короткие участки, где его характер условно считался стационарным. На этих участках был изучен частотный состав сигнала. Оценки спектральной плотности мощности (СПМ) были получены с применением метода классификации множественных

сигналов (MUSIC) [4], ориентированного на поиск синусоид в случайном шуме.

Спектральный анализ позволил более подробно определить характер нестационарных явлений, регистрируемых датчиками. На рис. 5 представлено изменение характерных частот этих явлений. Здесь штриховыми линиями обозначены частоты вращения роторов. При разгоне двигателя с открытыми КПВ присутствуют мощные гармонические пульсации давления (кривая 1 на рис. 5), рис. 6.

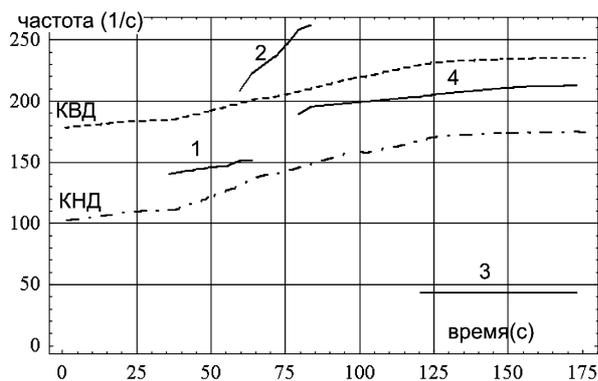


Рис. 5. Характерные частоты, обнаруженные в сигнале давления

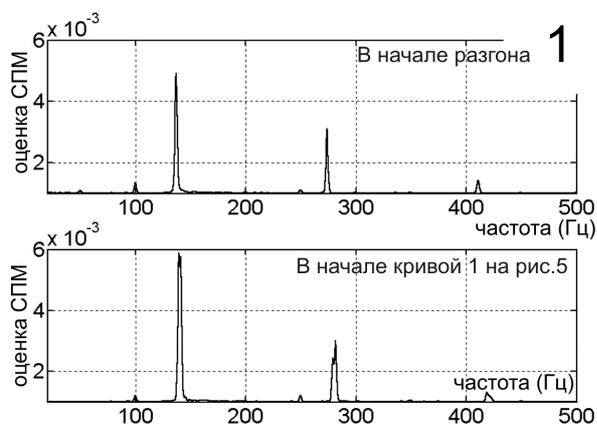


Рис. 6. Оценки СПМ сигнала давления

Они имеют фундаментальную частоту, составляющую примерно 75% частоты вращения КВД, что с учетом его большого относительного диаметра втулки и характерного поведения пульсаций (плавного и скачкообразного изменения частоты с ростом оборотов ротора) может быть отнесено к срывным явлениям в КВД. Эти пульсации достаточно сильны, чтобы вызывать вибрации двигателя (рис. 7). При вычислении функции когерентности было использо-

вано равноволновое окно Чебышева с отношением уровней главного и боковых лепестков 40 дБ.

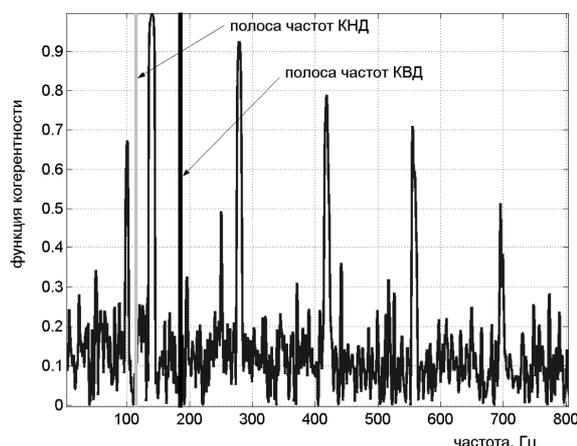


Рис. 7. Функция когерентности сигналов датчика давления и акселерометра при открытых КПВ

После закрытия КПВ сильные гармонические составляющие сигнала исчезают (рис. 8).

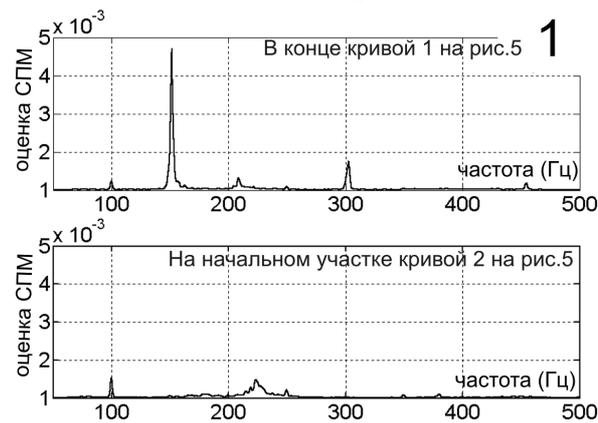


Рис. 8. Оценки СПМ сигнала давления

Некоторое время остается лишь узкополосный случайный шум (кривая 2, рис. 5) с центральной частотой, быстро растущей с увеличением частоты вращения роторов (рис. 9).

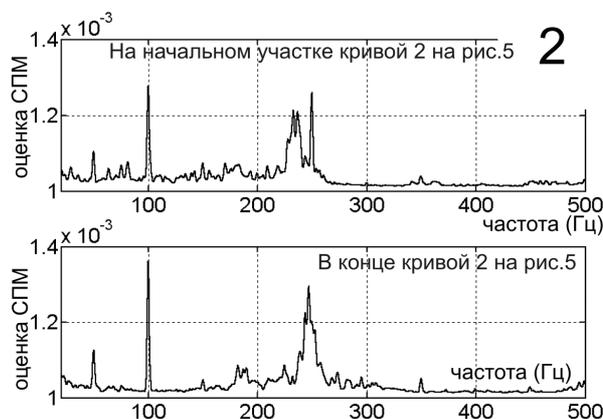


Рис. 9. Оценки СПМ сигнала давления

Вскоре это явление исчезает, уступая место узкополосному шуму с центральными частотами, примерно соответствующими 90% частоты вращения КВД (кривая 4 на рис. 5) и 25% частоты вращения КНД (кривая 3 на рис. 5). СПМ низкочастотной составляющей растет с увеличением частоты вращения роторов (рис. 10).

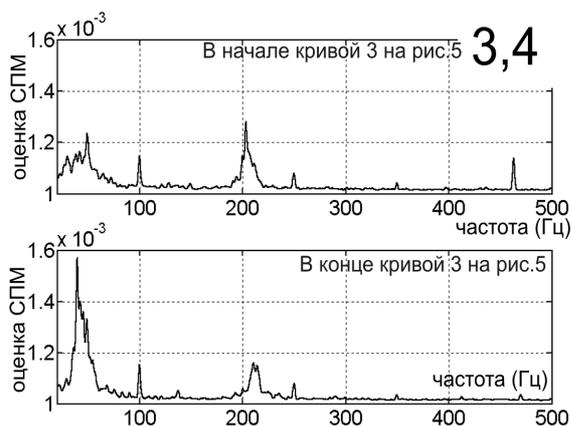


Рис. 10. Оценки СПМ сигнала давления

Появление характерного узкополосного шума на 25% частоты вращения КНД при закрытых КПП может указывать на срывные явления в КНД, однако к заметным вибрациям корпуса двигателя это не приводит (рис. 11).

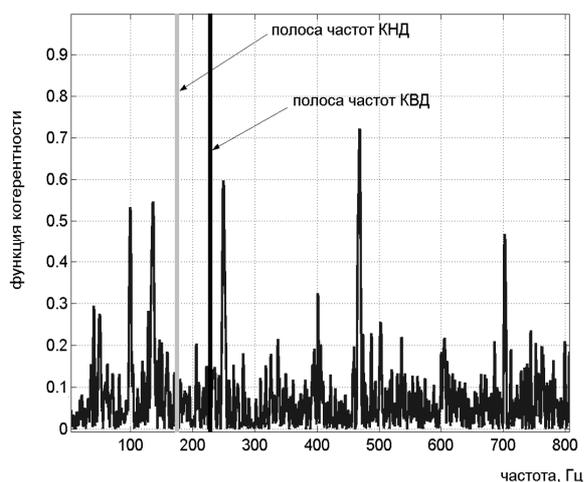


Рис. 11. Функция когерентности сигналов датчика давления и акселерометра при закрытых КПП

Очевидно низкое давление, возникающее на входе в КВД при открытых КПП вызывает в нем периодические пульсации давления. Аналогичная ситуация часто возникает в двухконтурных авиационных

двигателях [5]. Как средство предотвращения этого явления в [5] предлагается полная изоляция входа КВД от потока в наружном контуре.

### Заключение

Совместное применение Wavelet-анализа и спектрального анализа сигналов малоинерционных датчиков давления и акселерометров, установленных на корпусе двигателя позволило определить источник повышенных уровней пульсаций давления на входе в камеру сгорания во время переходных режимов работы двухвального ГТД. Эти пульсации вероятнее всего вызваны срывными явлениями в КВД, возникающими при открытии КПП, установленных на выходе КНД и в переходном канале между каскадами.

### Литература

1. Методология и опыт газодинамической доводки базовых двигателей IV поколения / А.Б. Михайлов, В.П. Сорокин, Г.В. Терехин, А.А. Филоненко, В.Н. Чобенко // Судовое и энергетическое газотурбостроение: Научн. техн. сб. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машпроект», НО ИАУ. – 2004. – Т. 1. – С. 131-136.
2. Мафиудакис, Лукис, Папаилиу. Вибрации корпуса и условия работы газовых турбин // Современное машиностроение. Сер.А. Энергетические машины и установки. – 1991. – № 3. – С. 67-74.
3. Abry P. Ondelettes et turbulence. Diderot ed., Paris. – 1997. – 268 p.
4. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.:Мир,1990. – 584 с.
5. Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров. – М.: Мир, 2000. – 543 с.

Поступила в редакцию 14.06.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.