

УДК 621.45.01

М.М. КУДИН¹, В.Ю. БЕРЕЖНОЙ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²ГП НПКГ «Зоря - Машпроект», Николаев, Украина

ЛАЗЕРНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА И ВИБРАЦИЙ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА

Приведена оценка неравномерности шага, радиального зазора, частоты вибраций рабочих лопаток вентилятора. Два луча инфракрасного лазера, отраженные от концов пластиковых лопаток работающего вентилятора падали на два фотодиода. Полученный двухканальный сигнал записывался в компьютер. Для его анализа были использованы спектры, корреляционные функции, кепстр и вейвлет-преобразование. В сигнале были обнаружены частоты вращения ротора, прохождения лопаток, их вибраций, а также неравномерность шага лопаток и радиального зазора. Для облегчения интерпретации результатов использовано математическое моделирование сигнала и модальный анализ лопатки вентилятора с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: вентилятор, радиальный зазор, вибрации, лазер, измерительная система, корреляция, спектр, кепстр, вейвлет.

Введение

Радиальный зазор в компрессоре и турбине – один из главных факторов, влияющих на экономичность двигателя и показатель технического уровня его производителя. Обеспечить минимальный радиальный зазор на всех режимах работы двигателя трудно из-за значительных изменений размеров деталей от тепловых и механических нагрузок.

Решить эту задачу позволит управление радиальным зазором, например, при помощи локального изменения температуры деталей. Для его осуществления нужны датчики, которые позволяют в реальном времени определять радиальный зазор для отдельных лопаток при работе двигателя. Такие датчики, использующие отраженное от концов лопаток СВЧ-излучение уже используются на предприятии «Зоря-Машпроект» [1]. В настоящей статье рассмотрены возможности применения инфракрасного лазерного модуля для измерения радиального зазора и других важных для диагностики параметров рабочего колеса (неравномерность шага лопаток и их колебания).

1. Измерительная система

Для исследований был использован монолитный лазерный модуль CDROM и пластиковый вентилятор. Установка лазерного модуля над рабочими лопатками вентилятора показана на рис. 1. Луч инфракрасного лазера 4 проходя через дифракционную решетку 3 расщепляется на три луча (центральный не показан). Лучи падают на призму Волластона 2 и направляются на торец рабочей лопатки 1. Отразившись от лопатки, они снова проходят через призму и падают на фотодиоды E и F интегральной микросхемы, предназначенной для преобразования инфракрасного излучения в электрический сигнал и его усиления. Полученный двухканальный электрический сигнал записывался в компьютер с частотой дискретизации 96 кГц с использованием обычной звуковой карты.

лучи падают на призму Волластона 2 и направляются на торец рабочей лопатки 1. Отразившись от лопатки, они снова проходят через призму и падают на фотодиоды E и F интегральной микросхемы, предназначенной для преобразования инфракрасного излучения в электрический сигнал и его усиления. Полученный двухканальный электрический сигнал записывался в компьютер с частотой дискретизации 96 кГц с использованием обычной звуковой карты.

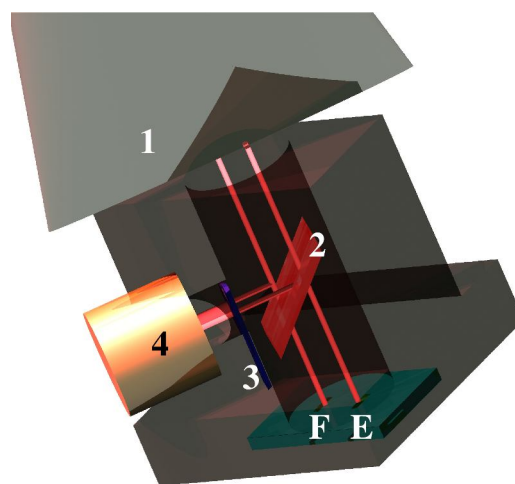


Рис. 1. Схема измерений

Кроме элементов, показанных на упрощенной схеме модуль содержит подвижную линзу для фокусировки лучей и цилиндрическую линзу для системы управления фокусировкой. Подвижная линза

была зафиксирована в положении, обеспечивающем достаточную фокусировку при помощи клея. Основной луч (не показан на рисунке), проходящий через цилиндрическую линзу, не использовался, однако для измерения радиального зазора он тоже может быть применен, поскольку штатно обеспечивает точность измерения расстояния до диска $\pm 1,9 \mu\text{м}$ в диапазоне расстояний $\pm 0,5 \text{мм}$.

2. Обработка измерительной информации

Сигналы, записанные от двух фотодиодов E и F, показаны на рис. 2. На рисунке видны провалы напряжения при прохождении торца лопатки (усилители тока фотодиодов – инвертирующие). Из рисунка видно, что несмотря на наличие шума, они коррелируют друг с другом.

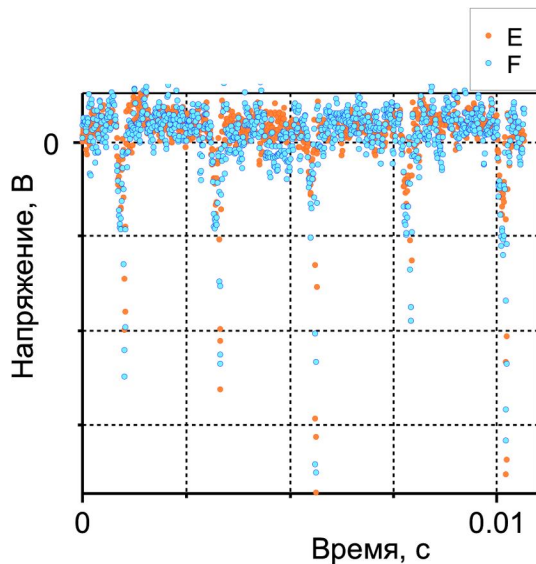


Рис. 2. Сигналы лазерного модуля

Для определения частотного состава сигналов был произведен их спектральный анализ. Автоспектры сигналов E и F в значительной степени совпали с их взаимным спектром, который показан на рис. 3. В спектре присутствуют слабые составляющие, связанные с оборотной частотой (62 Гц) и сильные составляющие с фундаментальной частотой, соответствующей частоте прохождения семи рабочих лопаток. Для построения спектра был применен классический метод Уэлча. Фрагмент автоспектра сигнала F показан на рисунке 4. В спектре присутствуют сильные гармоники частоты следования семи рабочих лопаток. Для построения спектра применено быстрое преобразование Фурье и прямоугольное окно данных.

Поиск в сигнале неравномерности радиальных зазоров лопаток был произведен с использованием корреляционного анализа.

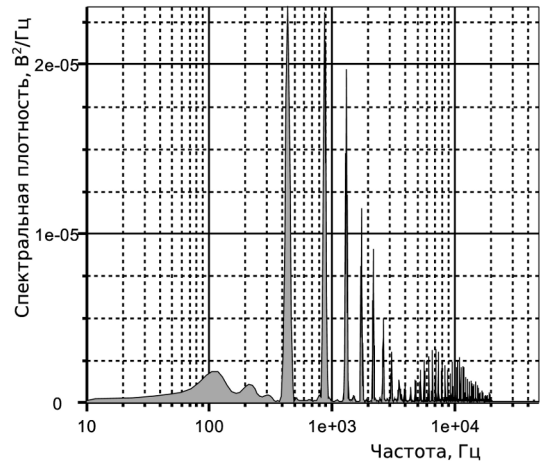


Рис. 3. Взаимный спектр сигналов E и F

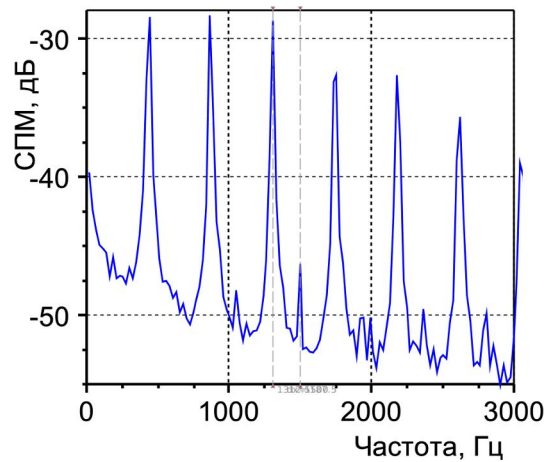


Рис. 4. Спектр сигнала F

На рис. 5 показана автокорреляционная последовательность (АКП) сигнала F.

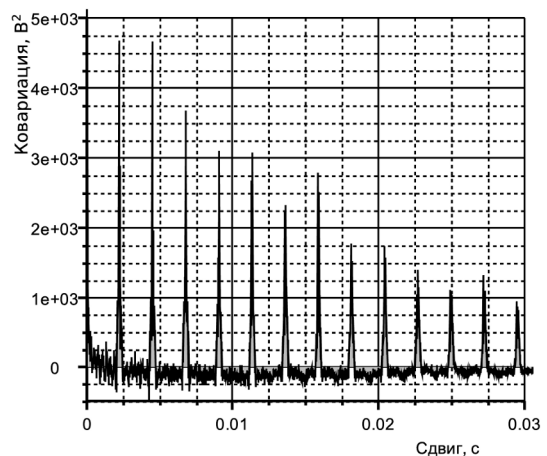


Рис. 5. АКП сигнала F

Здесь локальные максимумы, соответствуют отдельным лопаткам. Распределение их величин повторяется через сдвиг времени, соответствующий одному обороту ротора.

Более подробное изображение автокорреляционной и взаимной корреляционной функций сигналов показано на рис. 6. Протекание функций имеет особенности, которые можно связать с неравномерностью шага и колебаниями лопаток.

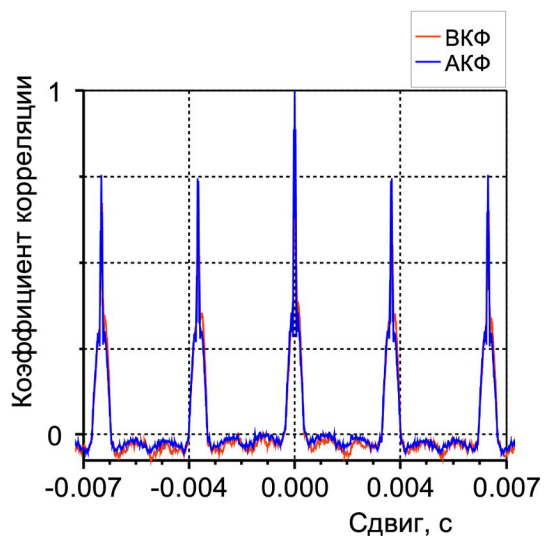


Рис. 6. Корреляционные функции сигналов F, E

Как показал анализ модели сигнала, построенной с использованием функции *pulstran* компьютерной системы OCTAVE, характерный вид распределения локальных максимумов связан не с неравномерностью зазора, а с неравномерностью шага рабочих лопаток, поэтому появилась необходимость в проведении вейвлет-анализа сигнала. На рисунке 7 показана деталь дискретного вейвлет-преобразования с использованием вейвлета Добеши (db4).

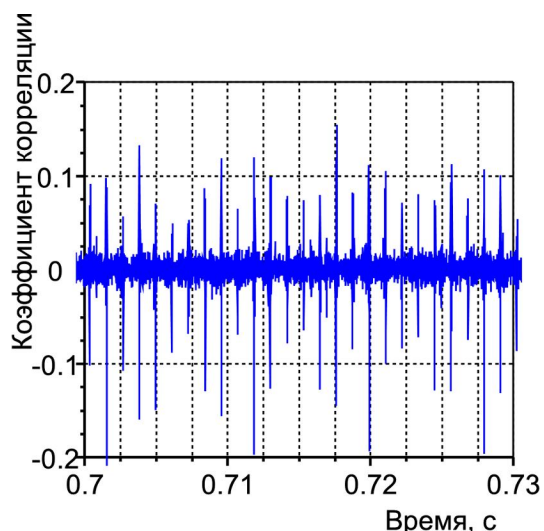


Рис. 7. Деталь дискретного вейвлет-преобразования сигнала F

На рисунке наблюдаются составляющие, связанные с окружной неравномерностью радиального зазора.

На рис. 8 показаны результаты непрерывного вейвлет-преобразования сигнала. Использован вейвлет «мексиканская шляпа». Отчетливо наблюдается периодическая структура для масштабов, соответствующих расстоянию между лопатками.

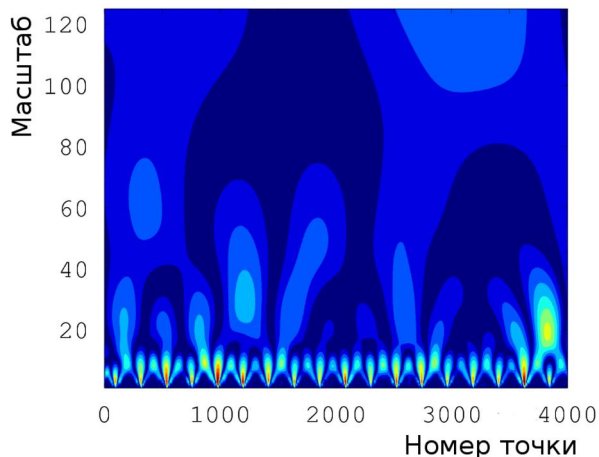


Рис. 8. Вейвлет-преобразование сигнала F

Поиск информации о колебаниях вращающихся лопаток был произведен с использованием спектрального и кепстрального анализа, оценка собственной частоты колебаний лопатки была выполнена с использованием компьютерной программы SALOME-MECA. Результаты модального анализа показаны на рис. 9.

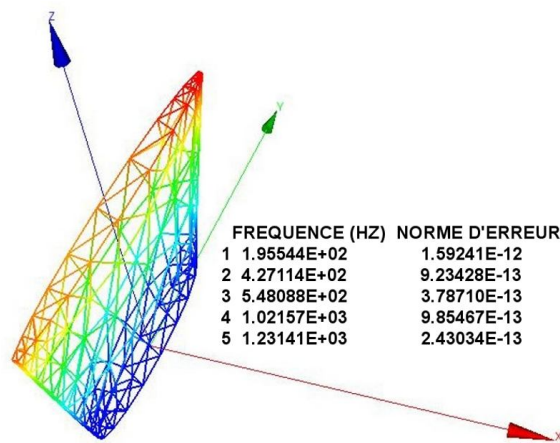


Рис. 9. Результаты модального анализа

В соответствии с эффектом Доплера, колебания вращающейся лопатки должны порождать боковые лепестки на расстоянии собственной частоты колебаний лопатки от гармоник частоты ее следования. Они видны на спектре (рис. 4) и кепстре [3] мощности (рис. 10). Соответствующие частота и квефренция помечены маркерами.

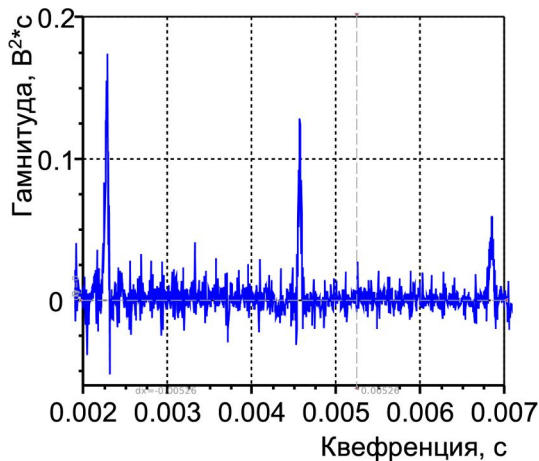


Рис. 10. Кепстр канала E

Заключение

Лазерный модуль CDROM при незначительной доработке представляет из себя точный быстродействующий датчик радиального зазора и вибраций рабочих лопаток турбомашин. К его достоинствам

принадлежит и низкая стоимость. Основными недостатками такого датчика является необходимость в оптическом доступе внутрь проточной части и трудность в применении на горячих частях двигателя. Результаты применения модуля для измерений на осевом вентиляторе дают возможность сделать вывод о том, что в сигнале содержится информация о неравномерности радиального зазора и шага лопаток, а также о частотах их колебаний.

Литература

1. *Test and validation of microwave tip clearance sensor on a 25Mw gas turbine engine [Текст] / D. Kwapisz, M. Hafner, V. Spitsyn, A. Mykhaylov, V. Berezhenoy // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 152-161.*
2. *Штарк, Г.-Г. Применение вейвлетов для ЦОС [Текст]: пер. с англ. / Г.-Г. Штарк. – М. : Техносфера, 2007. – 192 с.*
3. *Рандалл, Р.Б. Частотный анализ [Текст]: пер. с англ. / Р.Б. Рандалл. – Дания, Глоструп: К. Ларсен и сын, 1989. – 389 с.*

Поступила в редакцию 31.05.2012

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

ЛАЗЕРНЕ ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНОГО ЗАЗОРУ ТА ВІБРАЦІЙ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА

М.М. Кудін, В.Ю. Бережний

Приведена оцінка нерівномірності відстані лопаток, радіального зазору, частоти вібрації робочих лопаток вентилятора. Два проміни інфрачервоного лазера відбиті від кінців пластикових лопаток працюючого вентилятора падали на два фотодіоди. Отриманий двоканальний сигнал записувався комп'ютером. Під час його аналізу були використані спектри, кореляційні функції, кепстр та вейвлет-перетворення. В сигналах були знайдені частоти обертання, проходження лопаток, їх вібрацій а також нерівномірність шага лопаток та радіального зазору. Для полегшення інтерпретації результатів використано математичне моделювання сигналу і модальний аналіз лопатки вентилятора з використанням метода кінцевих елементів.

Ключові слова: вентилятор, радіальний зазор, вібрації, лазер, вимірювальна система, кореляція, спектр, кепстр, вейвлет.

LASER TECHNIQUE OF FAN TIP CLEARANCE AND VIBRATIONS MEASUREMENT

M.M. Kudin, V.Y. Berezhenoy

Blade step uniformity, tip clearance, and vibrations of fan rotor blades was accomplished. Two infrared laser beams reflects from plastic blade tips of operating fan and catch by two photodiodes. Obtained two-channel signal was delivered to computer. Spectrum, correlation, cepstrum and wavelet transformation were used for signal analysis. Rotor revolution, blade pass and blade vibration frequencies, tip clearance and blade step nonuniformities were observed in analyzed signals. For easy results interpretation mathematical signal modeling and modal analysis of fan blade were used.

Key words: fan, tip clearance, vibrations, laser, measurement system, correlation, spectrum, cepstrum, wavelet.

Кудин Михаил Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: shel@3g.ua.

Бережной Валерий Юрьевич – начальник сектора динамики и прочности ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: vub@mashproekt.nikolaev.ua.