

УДК 531.781.2(088.8)

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК
ТУРБОАГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ СИГНАЛОВ
ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**© 2012 А. И. Данилин¹, А. Ж. Чернявский², С. А. Данилин¹¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)²ОАО «АВТОВАЗ», Тольятти,

В статье предложена новая реализация дискретно-фазового метода, позволяющая определить параметры колебаний лопаток турбомашин при помощи анализа искажений формы сигнала первичного преобразователя. Колебание лопаток приводит к искажению формы сигнала первичного преобразователя, анализ искажённого сигнала методами нелинейной аппроксимации позволяет определить параметры колебаний лопатки. Рассматривается устройство на основе данного метода.

Турбоагрегат, диагностика, лопатка, колебания, дискретно-фазовый метод, нелинейная аппроксимация, искажения, первичный преобразователь.

Обеспечение высокой надёжности газотурбинных двигателей и паровых турбин, увеличение их эксплуатационного ресурса имеют приоритетное значение и обуславливают необходимость разработки и применения эффективных автоматизированных средств диагностики и контроля состояния турбоагрегатов.

Наиболее нагруженными деталями турбомашин являются лопатки, поэтому диагностика их состояния является актуальной задачей.

Как свидетельствует статистика, несмотря на принимаемые меры, имеют место аварийные ситуации, связанные с поломкой лопаток. Поломка же лопатки, например, первой компрессорной ступени, практически полностью выводит турбомушину из строя и для её восстановления требуются значительные материальные и временные затраты. Кроме этого, при разрушении турбомашин существует реальная опасность травмирования персонала, возникновения пожара, разрушения строительных конструкций и коммуникаций. Поэтому диагностика дефектного состояния лопаток является актуальной для турбин, работающих в различных отраслях промышленности.

Так, по данным Самарского конструкторского бюро машиностроения за

период эксплуатации в 1995-2000 годах двигателей НК-12СТ по причине разрушения лопаток 1-ой ступени компрессора досрочно сняты с эксплуатации на ГКС 25 двигателей. Недоработка ресурса за 5 лет составила 870766 часов (средняя недоработка ресурса за 1 год - 174153 часа). По данным технической службы российской грузовой авиакомпании «ВОЛГА-ДНЕПР» за период эксплуатации в 1991 – 2006 г.г. девяти серийных транспортных самолетов Ан-124 с двигателями Д-18Т зафиксировано 43 случая разрушения двигателей, причём 23 случая - по причине повреждения или разрушения лопаток, т.е. 53% от всех причин выхода из строя двигателей связано с надёжностью лопаточного аппарата.

Известны различные методы и средства диагностики и контроля деформационного состояния лопаток на эксплуатируемых турбоагрегатах, например описанные в [1]. Среди этих методов перспективным является бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), позволяющий определять индивидуальное деформационное состояние каждой лопатки рабочего колеса турбомашин.

При использовании ДФМ параметры колебаний лопаток определяются на основе анализа временных интервалов прохождения лопаток около одного или нескольких первичных преобразователей и

соответствующей интерпретацией полученных значений в области механических напряжений и деформаций

Деформационное состояние лопаток оценивается по результатам контроля амплитуды колебаний лопаток и смещения координат их торцов от исходного рабочего положения (образование разношаговости) под воздействием статических и динамических нагрузок. Изменение параметров колебаний лопатки является диагностическим признаком, отражающим деформационное состояние лопаток.

В настоящее время известны несколько подобных систем, реализующих ДФМ и предназначенные для диагностики и контроля лопаток паровых и газовых турбин:

- разработки 80-х годов ЭЛУРА, ЭЛИА, ЦИКЛ;
- «Комплекс для измерения вибраций» разработки НПП «МЕРА»;
- «Автоматизированная система контроля и диагностики» разработки НПП «ЭЛЕКТРУМ-Л»;

□ Non-Intrusive Stress Measurement System разработки компании Agilis Measurement Systems, Inc. (США);

□ система контроля деформационного состояния лопаток турбомашин (СКДСЛ) разработки специалистов СГАУ [2, 3], предназначенная для определения деформационного состояния лопаток на эксплуатируемых турбомашинах при минимальном объеме их препарирования.

Для целей диагностики и определения параметров колебаний лопаток могут применяться различные виды первичных преобразователей – индукционные, вихретоковые, ёмкостные, оптоэлектронные, СВЧ. Прохождение лопатки около первичного преобразователя вызывает генерацию сигнала соответствующей формы на выходе (рис. 1).

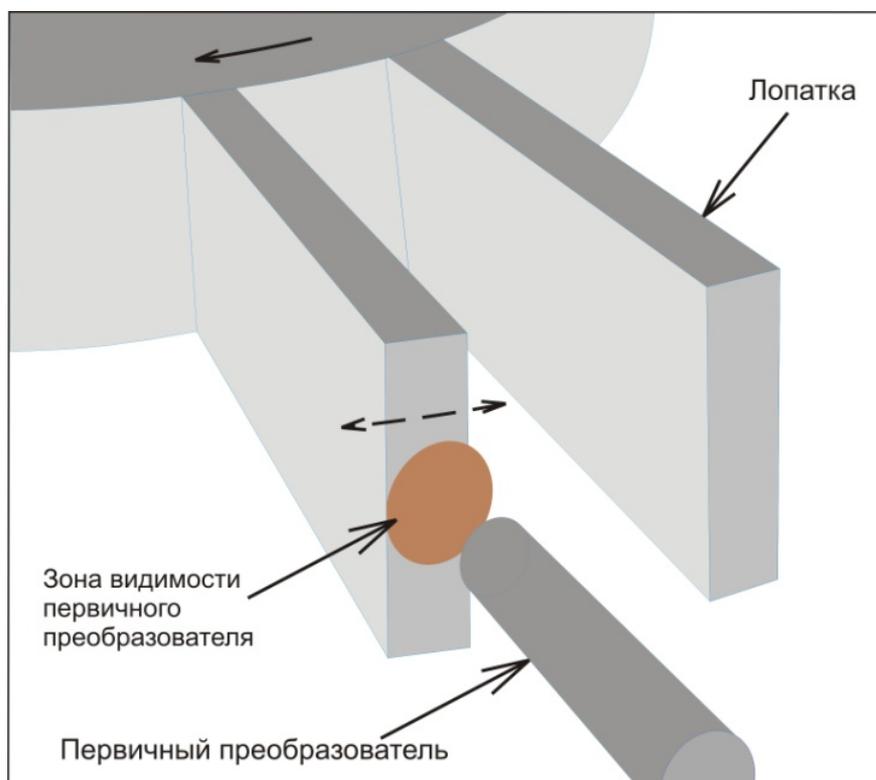


Рис. 1. Прохождение лопатки около первичного преобразователя

Традиционные реализации ДФМ опираются на анализ временных интервалов между импульсами, соответствующими прохождению лопаток. С другой стороны,

колебательный характер движения лопатки и неравномерность мгновенной скорости лопатки приводят к искажению формы генерируемого импульса. По степени

искажений генерируемого импульса возможно определить параметры колебаний контролируемой лопатки.

Пусть, например, первичный преобразователь при прохождении лопатки генерирует импульс колоколообразной формы, который может быть описан выражением для гауссова импульса:

$$s(y) = \exp\left(-\frac{y^2}{2a_y^2}\right), \quad (1)$$

где y – перемещение лопатки, a_y – параметр гауссова импульса.

$$s(t) = \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \cdot \left(t + \frac{A}{R\omega_\kappa} \sin(\omega_\lambda t + \varphi)\right)^2\right). \quad (3)$$

При отсутствии колебаний:

$$s(t) = \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \cdot t^2\right), \quad (4)$$

где $a_t = \frac{a_y}{R\omega_\kappa}$ – параметр гауссова импульса,

имеющий размерность времени. Форма выходных сигналов первичного

Предположим, что лопатка колеблется по синусоидальному закону. Тогда перемещение лопатки будет иметь две составляющие – вращательную и колебательную и определится как:

$$y(t) = R\omega_\kappa t + A \sin(\omega_\lambda t + \varphi) \quad (2)$$

где R – радиус колеса, ω_κ – угловая частота вращения колеса, ω_λ и φ – угловые частота и начальная фаза колебаний лопатки.

В этом случае выходной сигнал при наличии колебаний определится как:

преобразователя в обоих случаях показана на рис. 2.

Для определения неизвестных параметров колебания лопатки – амплитуды A , частоты ω_λ и начальной фазы φ – путём анализа выходного сигнала первичного преобразователя необходимо решить систему как минимум 3-х нелинейных уравнений вида:

$$\begin{cases} s(t_1) - \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \cdot \left(t_1 + \frac{A}{R\omega_\kappa} \sin(\omega_\lambda t_1 + \varphi)\right)^2\right) = 0, \\ s(t_2) - \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \cdot \left(t_2 + \frac{A}{R\omega_\kappa} \sin(\omega_\lambda t_2 + \varphi)\right)^2\right) = 0, \\ s(t_3) - \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \cdot \left(t_3 + \frac{A}{R\omega_\kappa} \sin(\omega_\lambda t_3 + \varphi)\right)^2\right) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

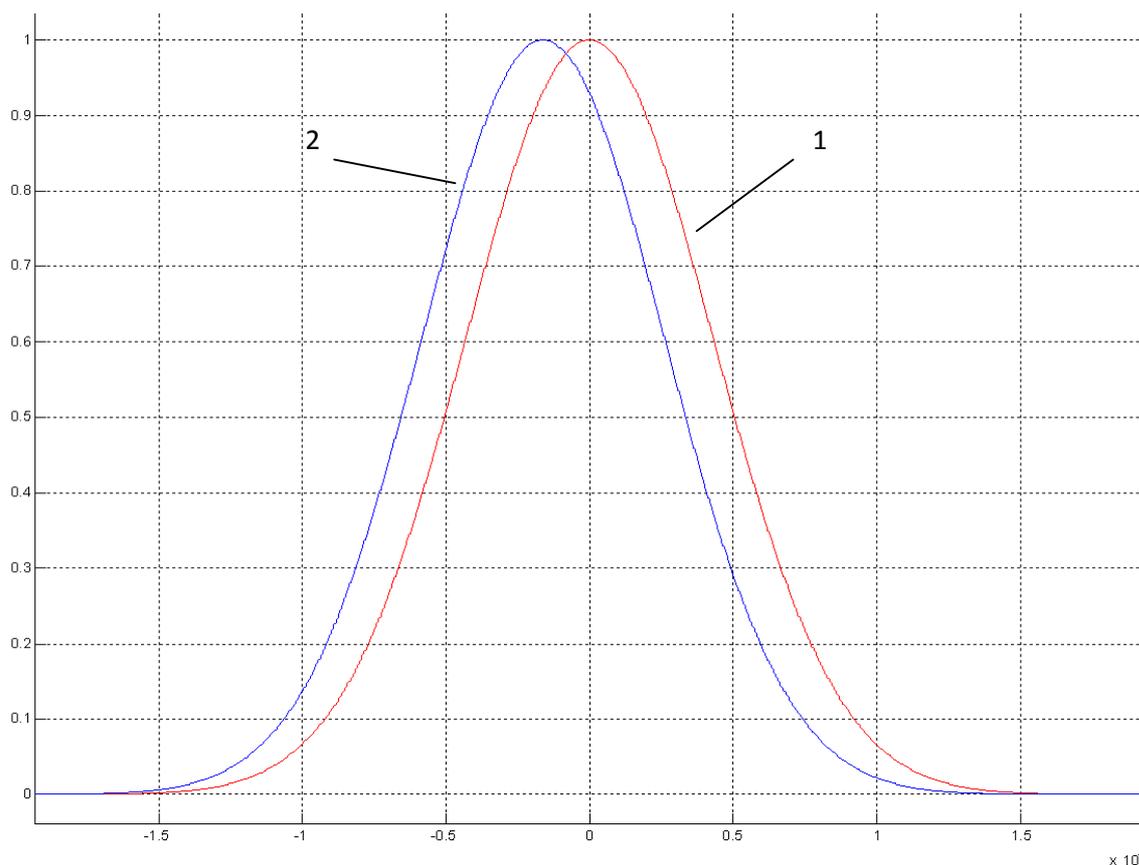


Рис. 2. Выходной сигнал первичного преобразователя
(1 – сигнал от неколеблющейся лопатки, 2 – от колеблющейся)

После преобразования данная система может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} A \sin(\omega_n t_1 + \varphi) = (a_t \sqrt{-2 \cdot \ln(s(t_1))} - t_1) \cdot R \omega_k, \\ A \sin(\omega_n t_2 + \varphi) = (a_t \sqrt{-2 \cdot \ln(s(t_2))} - t_2) \cdot R \omega_k, \\ A \sin(\omega_n t_3 + \varphi) = (a_t \sqrt{-2 \cdot \ln(s(t_3))} - t_3) \cdot R \omega_k, \end{cases} \quad (6)$$

где $s(t_1)$, $s(t_2)$, $s(t_3)$ – значения сигнала в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 .

Попытки решить систему уравнений (6) аналитически успехом не увенчались, в т.ч. и при использовании пакета Symbolic Toolbox, входящего в состав системы математических расчётов MATLAB.

Численные решения в системе MATLAB были найдены примерно в 50% случаев, в остальных – система либо не решалась вообще, либо решение сходилось к неправильному результату. Предварительное вычисление якобиана (матрицы частных производных 1-го порядка) перед численным решением ускоряет процесс решения, но также во многих случаях решение не находится.

Для определения параметров колебаний лопатки предлагается использовать методы нелинейной аппроксимации. В качестве исходных данных для аппроксимации задаются отсчёты сигнала первичного преобразователя от колеблющейся лопатки, в качестве целевой функции аппроксимации – функция (3), описывающая форму выходного сигнала первичного преобразователя.

Для нахождения параметров целевой функции (3) в системе MATLAB выполнялась нелинейная аппроксимация методом доверительных областей (Trust-Region), являющимся одной из вычислительных реализаций нелинейного метода наименьших квадратов.

Достоинством метода Trust-Region является возможность задания ограничений на значения параметров модели. Координаты точек для нахождения параметров целевой функции (3) задавались, исходя из значений сигнала первичного преобразователя, чувствительная зона которого взаимодействует с торцом колеблющейся лопатки.

Всего было выполнено 17 аппроксимаций для различных комбинаций

значений амплитуды, частоты и фазы колебаний лопаток, при этом число отсчетов исходного сигнала изменялось от 3 до 19 (табл. 1, рис.3).

Введение ограничений на параметры модели в значительной мере позволило избежать получения неправильного результата. Однако при таком подходе должны быть априори известны возможные диапазоны значений параметров.

Таблица 1. Сводные результаты аппроксимаций

| Кол-во точек | Параметры исходного сигнала | | | | Результат аппроксимации | | | SSE | R-square |
|--------------|-----------------------------|-------|--------|----------------|-------------------------|----------|----------------|-------------------------|-----------------|
| | Нвр, об/мин (Fк, Гц) | A, м | Fл, Гц | phi, рад | A, м | Fл, Гц | phi, рад | | |
| 19 | 1600 (26,6) | 0.025 | 250 | 2,2619 | 0.025 | 250,0324 | 8.545=2,265 | 1,675*10 ⁻⁸ | 0.9999 9998834 |
| 19 | 1600 (26,6) | 0.025 | 250 | 0,8 | 0.02499 | 250,0324 | 0,8003 | 3,833*10 ⁻⁹ | 0.9999 999973 |
| 19 | 8600 (143,3) | 0.01 | 152 | 1,0053 | 0.001099 | 151,8497 | 1,005 | 2,352*10 ⁻¹⁰ | 0.9999 9999983 |
| 3 | 8600 (143,3) | 0.01 | 250 | 0,8 | 0.01263 | 192,26 | 0,67 | 4,206*10 ⁻⁹ | 0.9999 99996 |
| 19 | 6000 (100) | 0.01 | 80 | pi | 0.009803 | 81.5032 | -9.425=-3.1418 | 9.318*10 ⁻¹¹ | 0.9999 99999935 |
| 19 | 6000 (100) | 0.01 | 120 | pi | 0.01041 | 115.1486 | -9.425=-3.1418 | 3.614*10 ⁻¹⁰ | 0.9999 99999748 |
| 19 | 6000 (100) | 0.01 | 120 | pi/8 (0.3927) | 0.009962 | 120.3052 | 0.3937 | 6.165*10 ⁻¹⁰ | 0.9999 9999957 |
| 19 | 6000 (100) | 0.01 | 80 | pi/8 (0.3927) | 0.01003 | 79.5934 | 0.391 | 9.045*10 ⁻¹⁰ | 0.9999 9999937 |
| 19 | 6000 (100) | 0.01 | 100 | pi | 0.00931 | 107.2704 | -9.425=-3.1418 | 4.05*10 ⁻¹⁰ | 0.9999 99999718 |
| 19 | 6000 (100) | 0.01 | 100 | pi/12 (0.2618) | 0.01024 | 97.3073 | 0.2551 | 2.354*10 ⁻⁶ | 0.9999 983 |

| | | | | | | | | | |
|----|---------------|------|-----|---------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| 19 | 6000 (100) | 0.01 | 100 | $\pi/8$ (0.392 7) | 0.0099 76 | 100,07 66 | 0.3931 | $6,248 \cdot 10^{-10}$ | 0.9999 9999 956 |
| 19 | 6000 (100) | 0.01 | 90 | 0 | 0.0103 1 | 87.137 3 | $1.43 \cdot 10^{-12}$ | $5.439 \cdot 10^{-10}$ | 0.9999 9999 962 |
| 11 | 6000 (100) | 0.01 | 90 | $\pi/4$ (0.785 4) | 0.0101 | 87.996 8 | 0.7739 | $1.289 \cdot 10^{-07}$ | 0.9999 9987 |
| 6 | 6000 (100) | 0.01 | 90 | $\pi/2$ (1.570 8) | 0.0099 85 | 90.638 7 | 1.571 | $2.044 \cdot 10^{-10}$ | 0.9999 9999 968 |
| 6 | 6000 (100) | 0.01 | 90 | $3 \cdot \pi/4$ (2.356 2) | 0.0098 11 | 93.360 3 | 2.338 | $7.482 \cdot 10^{-10}$ | 0.9999 9999 883 |
| 19 | 6000 (100) | 0.01 | 90 | π | 0.0099 47 | 90.384 1 | 3.142 | $9.784 \cdot 10^{-10}$ | 0.9999 9999 931 |
| 6 | 6000 (100) | 0.01 | 90 | π | 0.0099 49 | 90.352 3 | 3.142 | $8.902 \cdot 10^{-11}$ | 0.9999 9999 986 |

Точность аппроксимации может быть оценена с помощью абсолютной или относительной погрешности определения параметров, что возможно только при заранее известных значениях параметров.

При заранее неизвестных значениях параметров точность аппроксимации возможно оценить по следующим критериям пригодности приближения:

- критерий SSE (Sum of squares due to error) - сумма квадратов ошибок;

- критерий R-квадрат (R-square) определяется как отношение суммы квадратов относительно регрессии SSR к полной сумме квадратов (SST). Критерий R-квадрат может принимать значения только от нуля до единицы и, как правило, чем ближе он к единице, тем лучше параметрическая модель приближает исходные данные.

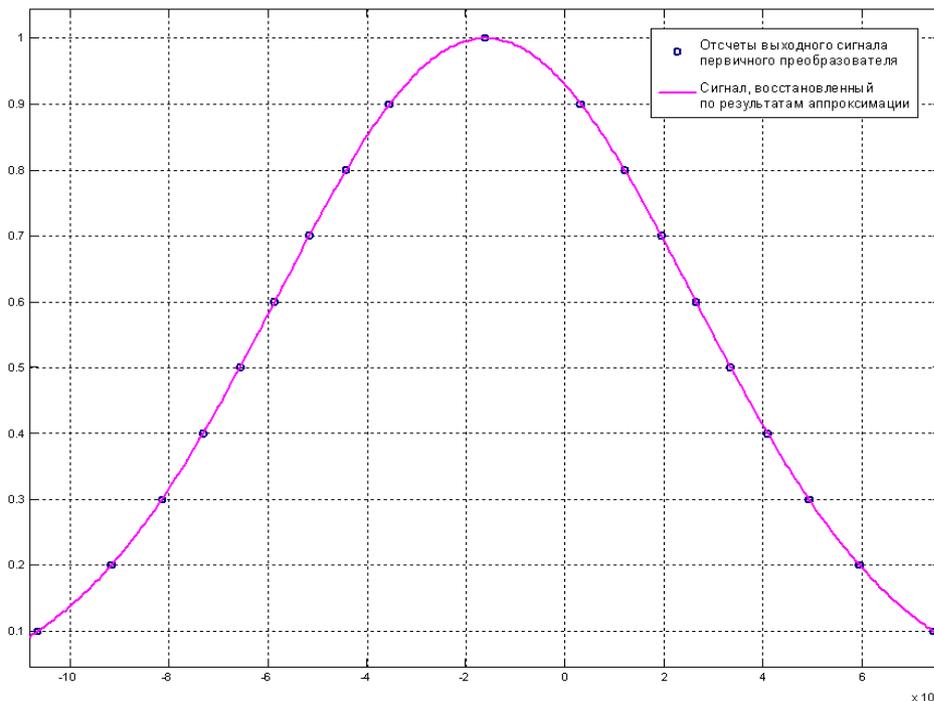


Рис. 3. Отсчёты выходного сигнала первичного преобразователя и сигнал, восстановленный по результатам аппроксимации

Результаты выполненных аппроксимаций показывают достаточно малые значения SSE и достаточно близкие к единице значения R-квадрат, что подтверждает хорошую точность аппроксимаций.

Таким образом, применение методов нелинейной аппроксимации позволило правильно определить параметры колебательного движения лопатки путём анализа сигнала первичного преобразователя при различных комбинациях амплитуд, частот и начальных фаз колебаний лопатки.

Для экспериментальной проверки разработанного метода предложено устройство для определения параметров колебаний лопаток турбоагрегатов на основе нелинейной аппроксимации сигналов первичных преобразователей.

Устройство состоит из блока предварительной обработки сигналов и подключенного к нему персонального компьютера (ПК) с соответствующей программой обработки (рис. 4).

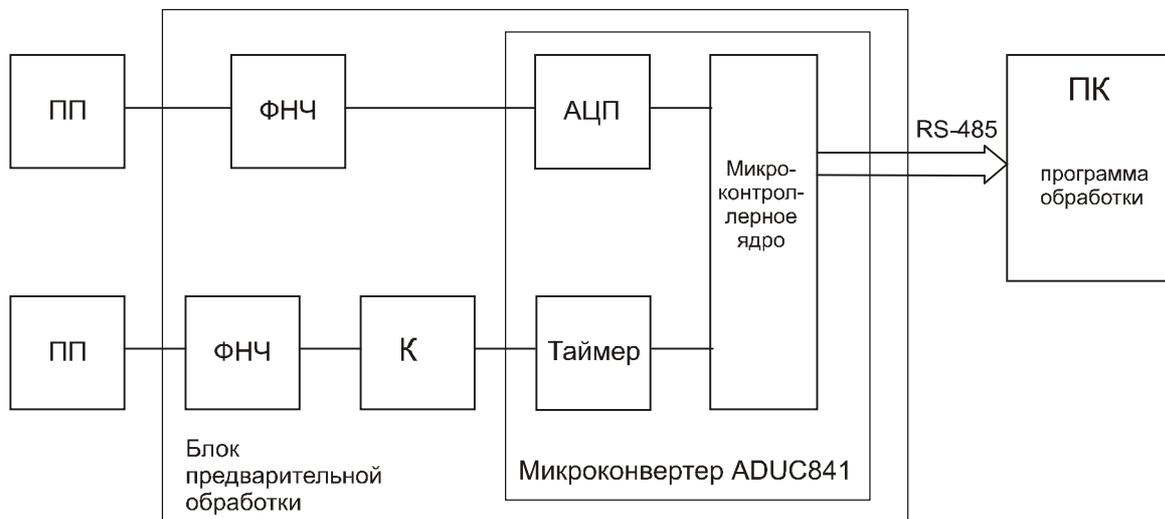


Рис. 4 Структурная схема устройства для определения параметров колебаний лопаток

Блок предварительной обработки сигналов выполнен на основе микроконвертера ADUC841 фирмы Analog Devices и выполняет функции обработки сигналов первичных преобразователей – усиление, низкочастотную фильтрацию, аналого-цифровое преобразование, определение частоты вращения лопаточного колеса.

Перед аналого-цифровым преобразованием, для исключения наложений спектра и фильтрации помех выходные сигналы первичных преобразователей подвергаются низкочастотной фильтрации входными активными фильтрами второго порядка с частотой среза 100 кГц.

Микроконвертер ADUC841 представляет собой полностью

интегрированную однокристалльную систему сбора данных с высокоскоростным ядром, имеющую встроенные 12-ти разрядные АЦП и ЦАП высокого быстродействия с возможностью адресации памяти размером до 16 МБ. Минимальное время преобразования встроенного АЦП составляет 2,38 мкс, что является достаточным для оцифровки сигнала первичного преобразователя.

Выходной сигнал первичного преобразователя (ПП) (рис. 4), полученный при взаимодействии его чувствительного элемента с торцом лопатки, через активный фильтр низких частот (ФНЧ) подаётся на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), находящегося в составе микроконвертера ADUC841.

Выходной сигнал оборотного

первичного преобразователя через ФНЧ подаётся на компаратор (К) и далее на вход внутреннего таймера микроконвертера ADUC841 для измерения частоты вращения лопаточного колеса.

Измерение частоты вращения лопаточного колеса производится путём усреднения измеренных значений периода вращения.

Отсчёты сигнала первичного преобразователя по каждой лопатке запоминаются в оперативной памяти блока предварительной обработки совместно с измеренными значениями частоты вращения лопаточного колеса, после чего передаются по интерфейсу RS-485 на ПК для обработки в соответствии с разработанным алгоритмом.

На ПК специально разработанная в MATLAB программа принимает полученные данные, запоминает данные по каждой конкретной лопатке из лопаточного колеса и, используя методы нелинейной аппроксимации, выполняет необходимые вычисления, определяя в итоге параметры колебаний лопаток. Вследствие неопределённости времени завершения процесса аппроксимаций производится вычисление параметров колебаний каждой лопатки в режиме офф-лайн, после завершения расчётов по всем лопаткам система готова к расчёту по данным следующего периода вращения колеса.

Выводы

□ Анализируемый сигнал формируется в результате взаимодействия торца лопатки, перемещающегося сложным образом в зоне чувствительности первичного

преобразователя, с его электромагнитным полем. При этом колебательная составляющая сложного движения торца лопатки приводит к искажению формы сигнала.

□ Параметры колебаний торца лопатки - амплитуда, частота и начальная фаза – могут быть непосредственно определены в результате анализа изменений формы сигнала первичного преобразователя с использованием методов нелинейной аппроксимации.

□ Предложенное устройство позволяет произвести предварительную обработку сигналов первичных преобразователей, передать данные на ПК, а определить на ПК параметры колебаний лопатки методами нелинейной аппроксимации.

Библиографический список:

1. Заблоцкий, И.Е. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин [Текст] / И.Е. Заблоцкий, Ю.А. Коростелев, Р.А. Шипов - М.: Машиностроение, 1977.- 160 с.
 2. Данилин, А.И. Диагностика и контроль деформационного состояния лопаток турбоагрегатов [Текст] / А.И. Данилин, А.Ж. Чернявский, В.П. Сазанов - М.: Машиностроение, Контроль. Диагностика, №1 2003 г. С. 23-28.
- Данилин, А. И. Диагностика и контроль рабочего состояния лопаток паровых турбин [Текст] / А. И. Данилин, С. И. Адамов, А. Ж. Чернявский // Электрические станции, 2007 г. №7, С.19-25.

THE DEVICE FOR THE DETERMINATION OF BLADES OSCILLATION PARAMETERS BASED ON NONLINEAR APPROXIMATION OF PRIMARY TRANSDUCERS SIGNALS

© 2012 A. I. Danilin, A. Zh. Chernyavskiy, S. A. Danilin

New method for the determination of blades oscillation parameters is proposed. The approach is based on the analysis of primary transducers signals distortions using nonlinear approximation techniques. Blades oscillations lead to distortions of primary transducer output signal, non-linear approximation techniques allow to determine blade oscillation parameters. The system for the determination of blades oscillation parameters with front-end processing module and succeeding processing on PC is described.

Turbo-unit, diagnostics, blade, oscillations, discrete-phase method, non-linear approximation, distortions, primary transducer.

Информация об авторах

Данилин Александр Иванович, доктор технических наук, доцент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: aidan@ssau.ru. Область научных интересов: измерительные системы, разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Чернявский Аркадий Жоржевич, ведущий инженер управления главного механика ОАО АВТОВАЗ. E-mail: ark@vaz.ru. Область научных интересов: измерительные системы, разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Данилин Сергей Александрович, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева. Область научных интересов: преобразователи линейных и угловых перемещений элементов вращающихся узлов изделий машиностроения.

Danilin Alexander Ivanovich, Doctor of Engineering, associate professor, Chair of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P.Korolev (national research university). E-mail: aidan@ssau.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determination of parameters of turbine-units blade's operating condition.

Chernyavskiy Arkadiy Zhorzhevich, leading engineer, Joint-stock company AVTOVAZ. E-mail ark@vaz.ru. Area of research: measurement systems, developing methods and designing electronic equipment for determination of parameters of turbine-units blade's operating condition.

Danilin Sergey Alexandrovich, student, Samara State Aerospace University named after academician S.P.Korolev (national research university). Area of research: primary transducers of linear and angular movements of rotating units in machine building.