

Определение параметров колебаний лопаток турбоагрегатов на основе нелинейной аппроксимации сигналов первичных преобразователей

В. Г. ДОМРАЧЕВ,* В. М. ГРЕЧИШНИКОВ,** А. Ж. ЧЕРНЯВСКИЙ,**
А. И. ДАНИЛИН,** С. А. ДАНИЛИН**

* Московский государственный университет леса, Москва, Россия

** Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия, e-mail: aidan@ssau.ru

Описан метод определения параметров колебаний элементов вращающихся узлов турбоагрегатов, основанный на анализе изменений характеристик выходного сигнала первичного преобразователя. На примере разработанной аппроксимативной математической модели показана принципиальная возможность определения параметров колебаний лопаток турбомашин. Приведена структурная схема устройства для экспериментальной проверки предложенного метода.

Ключевые слова: турбина, лопатки, дискретно-фазовый метод, математическая модель, нелинейная аппроксимация.

A method for determination of oscillation parameters of elements of turbounits rotating assemblies based on the analysis of primary converters output signal variations is described. The principal possibility of determination of turbomachine blades, oscillation parameters is shown by the example of approximating mathematical model. The block scheme of the device for experimental testing of the suggested is presented.

Key words: turbine, blades, discrete-phase method, mathematical model, nonlinear approximation.

Обеспечение высокой эксплуатационной надежности и увеличение ресурсов газотурбинных двигателей (ГТД) и паровых турбин — важная проблема современного машиностроения. Наиболее дорогостоящими и ответственными деталями ГТД являются лопатки компрессоров и турбин, работающие в условиях высоких динамических нагрузок, экстремальных температур, эрозионных и коррозионных воздействий. Для нормальной эксплуатации ГТД и паровых турбин и предотвращения аварийных ситуаций необходимо контролировать техническое состояние лопаток в процессе работы энергоагрегатов.

В настоящее время контроль состояния лопаток проводится, в основном, на остановленной турбомашине эндоскопическими методами, что требует высокого профессионализма и ответственности технического персонала и является очень трудоемкой технологической операцией. Так, по данным фирмы «Роллс-ройс» объем эндоскопической диагностики на авиационных ГТД доходит до 45—60 % от общего объема диагностических работ.

Несмотря на все принимаемые меры, на практике возможны аварийные ситуации, связанные с поломкой лопаток, что полностью выводит турбомашину из строя на длительное время. Например, по парку ГТД, эксплуатируемых на компрессорных станциях магистральных газопроводов, недоработка ресурса двигателей по причине поломки лопаток составляет 10—20 % по разным типам турбомашин.

Существуют различные методы и средства диагностики и контроля деформационного состояния лопаток на эксплуатируемых турбоагрегатах (см., например [1]). Выделяется

бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), позволяющий определять индивидуальное деформационное состояние каждой лопатки рабочего колеса турбомашин. Развитие ДФМ находит применение в системах контроля деформационного состояния лопаток, предложенных в [2, 3].

В классических реализациях ДФМ измеряют временные интервалы между моментами прохождения лопаток напротив нескольких импульсных первичных преобразователей (ПП). На основе результатов измерений этих интервалов вычисляют амплитуды и частоты колебаний лопаток, а также смещения их торцов от исходного рабочего положения под воздействием статических и динамических нагрузок. Полученные значения указанных параметров интерпретируются затем в области механических напряжений и деформаций. Недостатки классического ДФМ связаны с использованием нескольких ПП, накоплением и обработкой статистических данных. В процессе эксплуатации изменение параметров служит диагностическим признаком, отражающим текущее техническое состояние лопаток.

Для диагностики и определения параметров колебаний лопаток можно применять различные виды импульсных ПП — индукционные, вихретоковые, емкостные, оптоэлектронные, сверхвысокочастотные и др. Прохождение лопатки в зоне видимости первичного преобразователя (рис. 1) вызывает на его выходе сигнал соответствующей формы. Колебательный характер движения лопатки и неравномерность ее мгновенной скорости приводят к изменению формы импульса. Ниже исследована возможность определения параметров колебаний контролируемой лопатки по степени различия

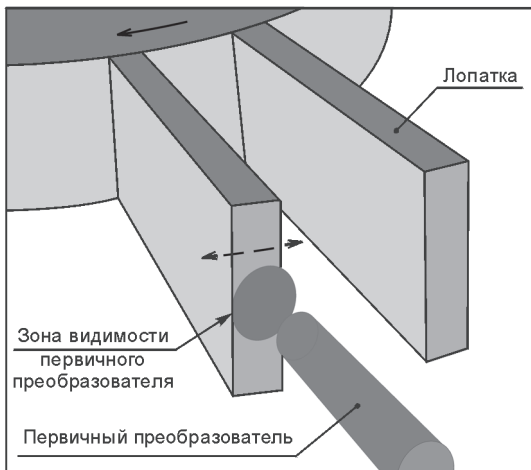


Рис. 1. Прохождение лопатки в зоне видимости первичного преобразователя

формы импульсов, формируемых динамически нагруженной (колеблющейся) и ненагруженной лопатками.

Пусть, например, импульсный ПП при прохождении ненагруженной лопатки в зоне его видимости генерирует импульс колоколообразной формы, который можно описать выражением для гауссова импульса [4]:

$$s(y) = \exp\left[-y^2/(2a_y^2)\right],$$

где y — перемещение торца лопатки; a_y — параметр гауссова импульса.

Предположим, что лопатка колеблется по синусоидальному закону. Тогда перемещение торца лопатки будет иметь две составляющие, обусловленные его окружным и колебательным движением:

$$y(t) = R\omega_k t + A \sin(\omega_n t + \varphi),$$

где R , ω_k — радиус и угловая частота вращения колеса; A , ω_n , φ — амплитуда, угловая частота и начальная фаза колебаний лопатки.

Выходной сигнал ПП при колебаниях лопатки можно представить в виде [4]:

$$s(t) = \exp\left[-\frac{1}{2a_t^2} \left[t + \frac{A}{R\omega_k} \sin(\omega_n t + \varphi)\right]^2\right].$$

При отсутствии колебаний $s^*(t) = \exp\left[-t^2/(2a_t^2)\right]$, где $a_t = a_y/(R\omega_k)$ — параметр гауссова импульса, имеющий размерность времени.

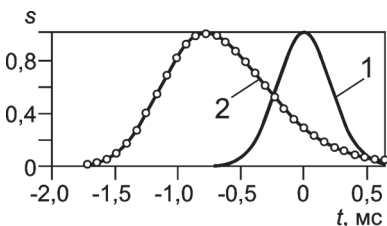


Рис. 2. Выходные сигналы первичного преобразователя в случае неколеблющейся (1) и колеблющейся (2) лопатки

Форма выходных сигналов первичного преобразователя в обоих случаях показана на рис. 2.

Для определения параметров колебаний лопатки целесообразно использовать методы нелинейной аппроксимации, суть которых заключается в нахождении неизвестных параметров $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ аналитического выражения $f_a(t_i, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, удовлетворяющих заданному критерию оптимальности [4]. В качестве исходных данных для аппроксимации задаются значения сигнала $s(t_i)$ первичного преобразователя от колеблющейся лопатки в моменты времени t_i ; их необходимо обработать таким образом, чтобы определить параметры колебательного движения и вместе с тем сгладить случайные отклонения, вызванные, например, шумами. Обычно в качестве критериев оптимальности используются точностные критерии. На практике хорошо зарекомендовал себя метод наименьших квадратов, обеспечивающий минимум среднеквадратической погрешности (СКП) аппроксимации [5].

Таким образом, аппроксимацию параметров модели можно интерпретировать как задачу оптимизации (минимизации) целевой функции. Если имеется несколько функций, удовлетворяющих критерию оптимальности, то наилучшей будет та, для которой СКП аппроксимации будет минимальной [5]:

$$\Delta^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [s(t_i) - f_a(t_i, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)]^2 = \min,$$

где M — количество отсчетов сигнала.

Так как Δ^2 является функцией параметров $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, необходимым условием минимума дифференцируемой функции многих переменных является выполнение условий, определяемых системой уравнений $\partial\Delta^2/\partial\alpha_1 = 0$; $\partial\Delta^2/\partial\alpha_2 = 0$; $\partial\Delta^2/\partial\alpha_n = 0$, решение которой численными методами дает искомые параметры.

При аппроксимации формы сигнала тем или иным методом в случае различного количества отсчетов исходного сигнала и их разных абсолютных значений необходимо оценить точность приближения, определить относительную методическую погрешность

$$\delta(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [s(t_i) - f_a(t_i, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)]^2}{\sum_{i=1}^M s^2(t_i)}}. \quad (1)$$

Выражение (1) можно рассматривать как целевую функцию оптимизации, связывающую относительную погрешность оптимизации δ с искомыми параметрами.

Применительно к задаче определения параметров колебаний лопаток ими будут амплитуда колебаний A , частота колебаний лопаток ω_n и начальная фаза φ . Тогда выражение для целевой функции оптимизации примет вид

$$\delta(A, \omega_n, \varphi) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \left[s(t_i) - \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \left(t_i + \frac{A}{R\omega_k} \sin(\omega_n t_i + \varphi)\right)^2\right) \right]^2}{\sum_{i=1}^M s^2(t_i)}}. \quad (2)$$

Для исследования поведения целевой функции в диапазоне допустимых значений указанных параметров и особенно в окрестности предполагаемого минимума удобно использовать графические представления. Так, на рис. 3 показана зависимость $\delta(A, F = \omega_n/2\pi, \varphi = \text{const})$.

Анализ выполненных графических представлений целевой функции позволил установить существенную нелинейность в области допустимых значений параметров, отсутствие разрывов и дифференцируемость; возможность оценки скорости сходимости по скорости снижения рельефа в графическом представлении; удовлетворительную сходимость A , φ и худшую по параметру ω_n . Последующие вычисления показали существенно меньшие значения первой частной производной δ по ω_n в сравнении с частными производными по A и φ . Также этот факт подтверждается выполненными расчетами градиента целевой функции. Вид графического представления целевой функции также позволяет выбирать точку начального приближения для запуска процесса оптимизации.

Для оценки реализуемости предложенного метода определения параметров колебаний лопаток были опробованы следующие методы оптимизации: безусловные методы деформируемых многогранников Нелдера—Мида и доверительных областей Ньютона; условный метод доверительных областей Ньютона с отражениями. Для всех методов задавали одинаковые начальные условия и, кроме того, для условного метода доверительных областей — допустимый диапазон значений параметров. Во всех экспериментах расчет выполняли с добавлением аддитивного равномерно распределенного шума для соотношений сигнал—шум 10^3 — 10^5 (60—100 дБ). Значения относительных погрешностей определения параметров целевой функции предложенными методами при каждом выбранном соотношении сигнал—шум рассчитывали и усредняли по 800 реализациям суммы сигнала и шума.

Полученные в результате оптимизаций по методам Ньютона, Нелдера—Мида и усреднений по методу Монте-Карло итоговые значения относительных погрешностей определения амплитуды, частоты, начальной фазы и, собственно, значения целевой функции в зависимости от соотношения сигнал—шум (С/Ш) приведены на рис. 4. В качестве примера на рис. 2 (кривая 2) точками показаны отсчеты выходного сигнала ПП. Параметры сигнала определены в результате нелинейной аппроксимации методом деформируемых многогранников Нелдера—Мида.

Таким образом, процедуры оптимизации, выполненные для различных значений параметров исходного сигнала, показали принципиальную возможность определения параметров колебаний лопаток предложенным методом. Проведенный анализ реализаций различных методов оптимизации позволил сделать следующие выводы:

применение в качестве целевой функции относительной СКП дает возможность сравнивать

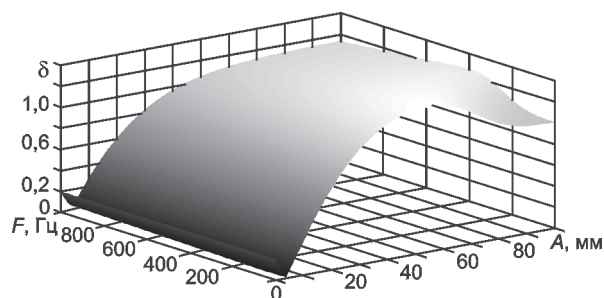


Рис. 3. Графическое представление целевой функции по (2) при $\varphi = \text{const}$

результаты различных аппроксимаций, имеющих различные исходные данные — амплитуды, количество точек и т. п.;

градиентные методы оптимизации показывают высокую скорость сходимости, при этом условные градиентные методы позволяют задать ограничения на значения параметров;

метод деформируемых многогранников Нелдера—Мида имеет более низкую скорость сходимости, но более высокую точность;

ухудшение соотношения сигнал—шум ведет к снижению точности определения параметров. Например, при соотношениях сигнал—шум порядка 1000 (60 дБ) и менее для оценки корректности результата требуется применить критерии согласия Пирсона или Колмогорова.

Для экспериментальной проверки разработанного метода предложено устройство (рис. 5) для определения параметров колебаний лопаток турбоагрегатов, состоящее из блока предварительной обработки (БПО) и подключенного к нему персонального компьютера (ПК).

Блок предварительной обработки выполнен на основе микроконвертера ADUC841 фирмы Analog Devices и обес-

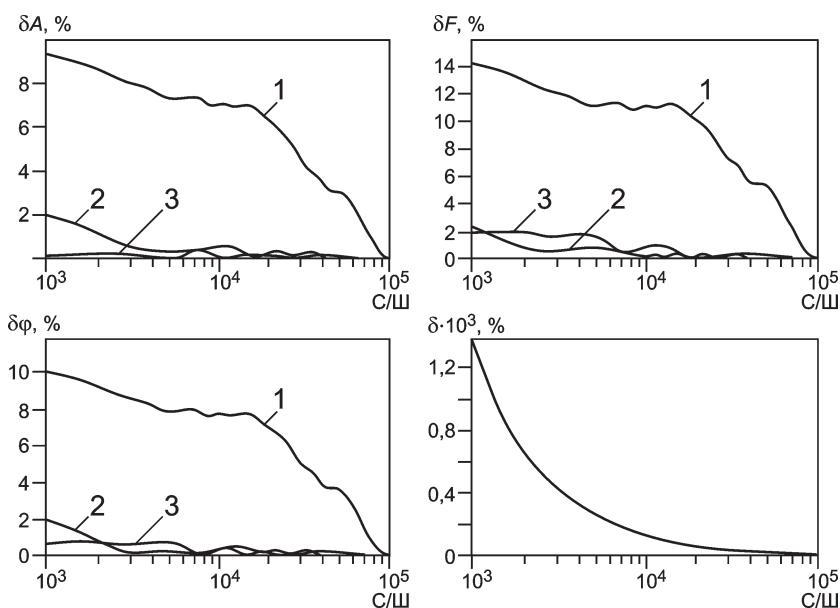


Рис. 4. Значения относительных погрешностей определения амплитуды, частоты, начальной фазы и значения целевой функции в зависимости от соотношения сигнал—шум (С/Ш)

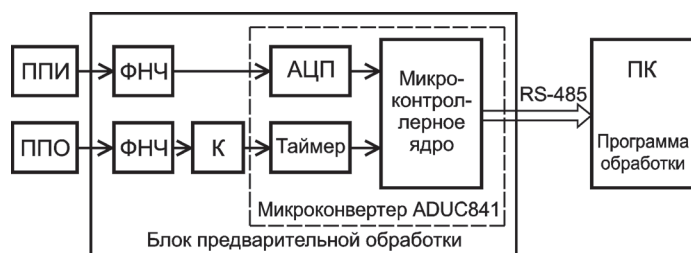


Рис. 5 Структурная схема устройства для определения параметров колебаний лопаток:

ППО, ППИ — оборотный и информационный первичные преобразователи; ФНЧ — фильтр низких частот; К — компаратор; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; RS-485 — интерфейс; ПК — персональный компьютер

печивает обработку сигналов оборотного ППО и информационного ППИ первичных преобразователей: усиление, низкочастотную фильтрацию, аналого-цифровое преобразование (АЦП), определение частоты вращения лопаточного колеса. Перед АЦП для исключения наложений спектра и фильтрации помех выходной сигнал ППИ подвергается низкочастотной фильтрации входным активным фильтром ФНЧ 2-го порядка с частотой среза 100 кГц. Микроконвертер ADUC841 представляет собой полностью интегрированную однокристалльную систему сбора данных с высокоскоростным ядром, имеющую встроенный 12-разрядный АЦП, минимальное время преобразования которого составляет 2,38 мкс.

Цепь выходного сигнала ППО содержит компаратор К и внутренний таймер микроконвертера ADUC841 для измерения частоты вращения лопаточного колеса. Отсчеты сигнала ППИ по каждой лопатке запоминаются в памяти БПО совместно с измеренными значениями частоты вращения лопаточного колеса, после чего передаются по интерфейсу RS-485 на ПК для обработки по специальному алгоритму. Программа, разработанная в MATLAB, принимает данные и с использованием методов нелинейной аппроксимации обеспечивает необходимые вычисления и получение в итоге параметров колебаний лопаток. Вследствие неопределенности времени завершения процесса аппроксимаций параметры колебаний каждой лопатки рассчитываются в режиме off-line. После завершения расчетов по всем лопаткам система готова к вычислению параметров колебаний по выходным сигналам ППИ, сформированным в течение следующего периода вращения лопаточного колеса.

Выводы. Параметры колебаний торца лопатки — амплитуду, частоту и начальную фазу — можно непосредственно определить в результате анализа изменений формы сигнала информационного ПП с использованием методов нелинейной аппроксимации. При определении параметров колебаний торца лопатки в качестве целевой функции в процессе поиска оптимальной аппроксимации формы сигнала ПП целесообразно использовать аналитическое выражение (2), обеспечивающее минимум относительной среднеквадратической погрешности аппроксимации. Предложенное авторами устройство позволяет провести предварительную обработку сигналов ПП, передать данные на ПК и с использованием разработанного программного обеспечения определить искомые параметры колебаний лопатки. Требуются дальнейшие исследования по выбору наиболее эффективного метода оптимизации и способов оценки результатов с применением критериев согласия.

Л и т е р а т у р а

1. **Заблоцкий И. Е., Коростелев Ю. А., Шипов Р. А.** Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. М.: Машиностроение, 1977.
2. **Данилин А. И., Чернявский А. Ж.** Диагностика и контроль деформационного состояния лопаток турбоагрегатов // Контроль. Диагностика. 2003. № 1. С. 23—28.
3. **Данилин А. И., Адамов С. И., Чернявский А. Ж.** Диагностика и контроль рабочего состояния лопаток паровых турбин // Электрические станции. 2007. № 7. С. 19—25.
4. **Чернявский А. Ж., Данилин А. И., Данилин С. А.** Преобразователи параметров динамических перемещений лопаток турбоагрегатов, основанные на нелинейной аппроксимации первичных сигналов // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. / Под ред. М. Н. Пиганова. Самара: Изд-во СГАУ, 2012. С. 44—46.
5. **Прохоров С. А.** Аппроксимативный анализ случайных процессов. Самара: Изд-во СГАУ, 2001.

Дата принятия 28.08.2013 г.