

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЛОПАТОК ТУРБОАГРЕГАТОВ, ОСНОВАННЫЕ НА НЕЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРВИЧНЫХ СИГНАЛОВ

© 2012 А. Ж. Чернявский¹, А. И. Данилин², С. А. Данилин²

¹ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти

²Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

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 искаженного сигнала методами нелинейной аппроксимации позволяет определить параметры колебаний лопатки.

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

Обеспечение высокой эксплуатационной надёжности газотурбинных двигателей (ГТД) и паровых турбин в условиях больших ресурсов является важной проблемой современного машиностроения. Наиболее дорогостоящими и ответственными деталями ГТД являются лопатки компрессора и турбины, работающие в сложных эксплуатационных условиях высоких динамических нагрузок, высоких температур, эрозионных и коррозионных воздействий.

Для нормальной эксплуатации ГТД и паровых турбин и предотвращения аварийных ситуаций необходимо контролировать состояние лопаток в процессе работы.

В настоящее время контроль состояния лопаток в эксплуатации проводится в основном на остановленной турбомашине эндоскопическими методами, требует профессионализма и ответственности технического персонала и является очень трудоемким. 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, имеют место аварийные ситуации, связанные с поломкой лопаток, которые полностью выводят турбомашину из строя на длительное время. Например, по парку ГТД, эксплуатируемых на компрессорных станциях магистральных газопроводов, недоработка ресурса двигателей по причине поломки лопаток составляет от 10 до 20% по разным типам турбомашин.

Существуют различные методы и средства диагностики и контроля деформационного состояния лопаток на эксплуатируемых турбоагрегатах, например, описанные в [1]. Среди этих методов выделяется бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), позволяющий определять индивидуальное деформационное состояние каждой лопатки рабочего колеса турбомшины. Дальнейшим практическим развитием ДФМ является система контроля деформационного состояния лопаток, предложенная авторами в [2].

В классических реализациях ДФМ определяются временные интервалы прохождения лопаток около одного или нескольких импульсных первичных преобразователей, на их основе вычисляются амплитуды колебаний лопаток и

смещения их торцов от исходного рабочего положения под воздействием статических и динамических нагрузок. Полученные значения амплитуды колебаний лопаток и смещения их торцов интерпретируются затем в области механических напряжений и деформаций.

Изменение указанных параметров является диагностическим признаком, отражающим эксплуатационное состояние лопаток.

Для целей диагностики и определения параметров колебаний лопаток могут применяться различные виды импульсных первичных преобразователей – индукционные, вихрековые, ёмкостные, опто-электронные, СВЧ и другие. Прохождение лопатки в зоне видимости первичного преобразователя вызывает генерацию сигнала соответствующей формы на выходе (рис. 1).

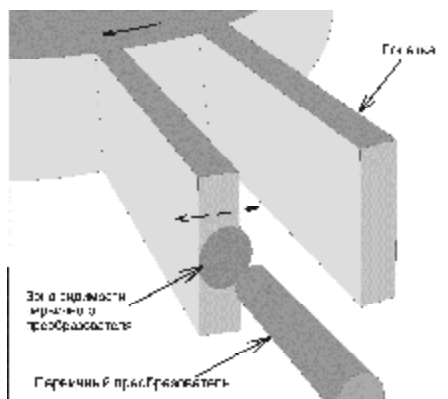


Рис. 1. Прохождение лопатки в зоне видимости первичного преобразователя

Колебательный характер движения лопатки и неравномерность мгновенной скорости лопатки приводят к искажению формы генерируемого импульса.

По степени искажений формы генерируемого импульса возможно определить параметры колебаний контролируемой лопатки.

Пусть, например, импульсный 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 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, и определится как:

$$y(t) = R w_{\kappa} t + A \sin(w_{\lambda} t + j), \quad (2)$$

где R – радиус колеса, w_{κ} – угловая частота вращения колеса, w_{λ} и j – угловые частота и начальная фаза колебаний лопатки.

В этом случае выходной сигнал при наличии колебаний определится как:

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

При отсутствии колебаний:

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

где $a_t = \frac{a_y}{R w_{\kappa}}$ – параметр гауссова импульса, имеющий размерность времени.

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

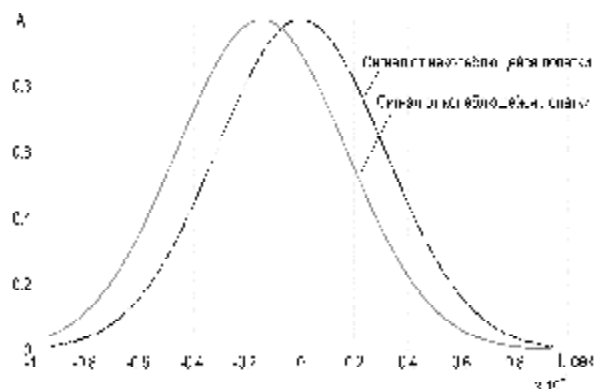


Рис. 2. Выходной сигнал первичного преобразователя

Для определения параметров колебаний лопатки авторами предложено использовать методы нелинейной аппроксимации, суть которых заключается в нахождении неизвестных параметров a_1, a_2, \dots, a_n аналитического выражения $f(x(t), a_1, a_2, \dots, a_n)$, удовлетворяющих заданному критерию оптимальности.

В качестве исходных данных для аппроксимации задаются отсчеты сигнала первичного преобразователя от колеблющейся лопатки $x(t)$. Необходимо обработать отсчеты сигнала таким образом, чтобы определить параметры колебательного движения и вместе с тем сгладить случайные отклонения, вызванные шумами и погрешностью измерений.

Обычно в качестве критериев оптимальности используются точностные критерии. Например, одним из эффективных критериев является метод наименьших квадратов, обеспечивающий минимум квадратичной погрешности аппроксимации [3].

Таким образом, аппроксимативная задача определения параметров модели может быть интерпретирована как задача оптимизации целевой функции.

Если имеется несколько функций, удовлетворяющих критерию оптимальности, то наилучшей будет функция, для которой квадратичная погрешность аппроксимации будет минимальной [3]:

$$\Delta = \sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)]^2 = \min, \quad (5)$$

где $F_x(x_i)$ - отсчеты сигнала первичного преобразователя, $f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)$ - аппроксимирующая функция, описывающая сигнал.

Так как Δ является функцией параметров a_1, a_2, \dots, a_n , то необходимым условием минимума дифференцируемой функции многих переменных является выполнение условий, определяемых системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)] \cdot \frac{\partial f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)}{\partial a_1} = 0; \\ \frac{\partial \Delta}{\partial a_2} = \sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)] \cdot \frac{\partial f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)}{\partial a_2} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial \Delta}{\partial a_n} = \sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)] \cdot \frac{\partial f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)}{\partial a_n} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

после решения которой численными методами определяются искомые параметры a_1, a_2, \dots, a_n .

При аппроксимации значений сигнала тем или иным методом, при различном количестве отсчетов исходного сигнала и их различных абсолютных значениях возникает задача оценки точности приближения. В этом случае наиболее целесообразно определять относительные методические погрешности:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^M [F_x(x_i) - f_a(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)]^2}{\sum_{i=1}^M F_x^2(x_i)}. \quad (7)$$

Таким образом, выражение (7) описывает целевую функцию оптимизации, связывающую относительную погрешность оптимизации d с искомыми параметрами a_1, a_2, \dots, a_n .

Существующие алгоритмы оптимизации в зависимости от необходимости нахождения производных целевой функции могут быть условно разделены на следующие классы:

- методы нулевого порядка (безградиентные методы), основанные только на вычислении значений целевой функции. К таким методам относится, например, метод деформируемых многогранников Нелдера – Мида [5]. Безградиентные методы более пригодны для задач, где минимизируемая функция является существенно нелинейной или имеет разрывы;

- методы первого порядка (градиентные методы), использующие значения первых производных целевой функции (якобиана целевой функции). Градиентные методы обычно эффективны в

случаях целевых функций, непрерывных вместе с первыми производными;

- методы второго порядка, в которых кроме первых производных целевой функции (якобиана или его оценки) используются вторые производные целевой функции (гессиан целевой функции или его оценка). Методы второго порядка применяются реже, поскольку требуют больших вычислительных затрат для расчета матриц вторых производных.

Кроме того, в зависимости от отсутствия или наличия ограничений на значения параметров, алгоритмы могут быть разделены на безусловные и условные (с ограничениями в виде неравенств и равенств).

Также иногда невозможно или очень трудно найти аналитическое выражение для производных целевой функции. Поэтому, при использовании градиентных методов, применяются процедуры конечно – разностной аппроксимации якобиана и гессиана целевой функции.

Для исследования поведения целевой функции в диапазоне допустимых значений параметров и, особенно, в окрестности предполагаемого минимума, были получены графические представления целевой функции. Поскольку исследуемая целевая функция является функцией трех параметров A , w_d , j , то графические представления целевой функции были построены в двух вариантах - в зависимости от частоты колебаний лопаток w_d и амплитуды A при фиксированном значении начальной фазы j и в зависимости от частоты колебаний лопаток w_d и начальной фазы j при фиксированном значении амплитуды A . Пример графического представления целевой функции d в координатах w_d и A представлен на рис. 3.

Анализ выполненных графических представлений целевой функции показал:

- существенную нелинейность целевой функции в области допустимых

значений параметров, отсутствие разрывов целевой функции и ее дифференцируемость;

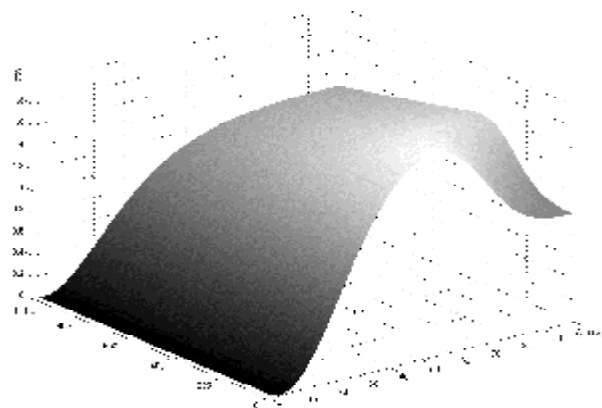


Рис. 3. Графическое представление целевой функции

- скорость сходимости целевой функции может быть оценена по скорости снижения рельефа в графическом представлении;

- удовлетворительную сходимость целевой функции по параметрам A и j и более худшую сходимость целевой функции по параметру w_d ;

- ухудшение соотношения сигнал/шум исходного сигнала из-за малой скорости схождения целевой функции по частоте резко снижает точность определения минимума целевой функции, точка минимума значительно смещается от своего положения при больших соотношениях сигнал/шум.

Последующие проходы алгоритма оптимизации показали существенно меньшие значения первой частной производной целевой функции по частоте колебаний лопаток w_d в сравнении с частными производными по амплитуде A и начальной фазе j . Также этот факт подтверждается выполненными расчетами градиента целевой функции.

Кроме этого, знание вида графического представления целевой функции позволяет выбирать точку начального приближения для запуска процесса оптимизации.

Для оценки реализуемости предложенного авторами метода определения параметров колебаний лопаток был выполнен ряд расчетов с применением различных методов оптимизации:

- безусловный метод деформируемых многогранников Нелдера-Мида (метод 1 в табл. 1);

- безусловный метод доверительных областей Ньютона (метод 2);

- условный метод доверительных областей Ньютона с отражениями (метод 3).

Для всех методов задавались одинаковые начальные условия, кроме того, для условного метода доверительных областей задавался допустимый диапазон значений параметров.

На рис. 4 показаны отсчеты выходного сигнала первичного преобразователя и сигнал, параметры которого определены в результате нелинейных аппроксимаций.

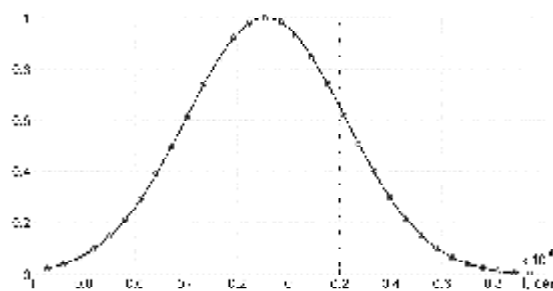


Рис. 4. Отсчеты выходного сигнала первичного преобразователя и сигнал, восстановленный по итогам аппроксимаций

Итоговые результаты для нескольких случаев оптимизаций с использованием указанных методов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Итоговые результаты оптимизаций

№	Кол-во точек	Параметры исходного сигнала				Результат аппроксимации		
		Нвр, об/мин	А, мм	Фл, Гц	phi, рад	А, мм	Фл, Гц	phi, рад
1	200	8200 С/ш= 100 000	0,5	100	pi/4	0,5003	98.54	0.785
						0,5995	72.07	0.631
						0,5614	80.00	0.681
2	200	8200 С/ш= 100 000	4,0	100	pi/4	4,00	99.28	0.783
						4,40	83.44	0.695
						4,50	80.16	0.676
3	200	8200 С/ш= 10 000	4,0	100	pi/4	4,00	99.09	0.790
						4,40	83.93	0.707
						4,50	80.04	0.683
4	200	8200 С/ш= 1000	4,0	100	pi/4	134,70	1.77	0.021
						4,10	81.16	0.769
						4,10	80.02	0.761
5	200	8200 С/ш= 500	4,0	100	pi/4	3,10	136.81	1.141
						3,60	80.90	0.906
						3,60	80.17	0.901

Таблица 1. Окончание

№	Кол-во точек	Кол-во итераций	Значение целевой функции	Метод
1	200	56420	1.2015e-10	1
		34	1.2738e-10	2
		44	1.2403e-10	3
2	200	23553	1.1341e-10	1
		35	2.9780e-10	2
		37	3.7267e-10	3
3	200	24265	1.3871e-08	1
		35	1.4041e-08	2
		37	1.4128e-08	3
4	200	192	1.2807e-06	1
		38	1.2813e-06	2
		38	1.2813e-06	3
5	200	17552	4.1643e-06	1
		45	4.1676e-06	2
		57	4.1677e-06	3

Таким образом, выполненные для различных значений параметров исходного сигнала оптимизации позволяют сделать следующие выводы:

- принципиальную возможность определения параметров колебаний лопаток предложенным методом;

- применение в качестве целевой функции относительной среднеквадратической погрешности дает возможность сравнивать между собой результаты различных аппроксимаций, с различными амплитудами, различным количеством точек и т.п.;

- градиентные методы оптимизации показывают высокую скорость сходимости, вместе с тем вопрос выбора наиболее оптимального метода требует дальнейшего изучения;

- ухудшение соотношения сигнал/шум ведет к снижению точности определения параметров, вплоть до невозможности определения.

Выводы

Анализируемый сигнал формируется в результате взаимодействия торца лопатки, перемещающегося сложным образом в зоне чувствительности первич-

ного 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, при использовании методов 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// Контроль. Диагностика. – 2003. – №1. – С.23-28.

3. Прохоров, С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов [Текст]/ С.А. Прохоров, 2-е изд., перераб. и доп./ Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. - 380 с.

PARAMETERS TRANSDUCERS OF THE BLADE'S DYNAMIC MOVEMENTS OF TURBOUNITS BASED ON NONLINEAR APPROXIMATION OF PRIMARY SIGNALS

© 2012 A. Zh. Chernyavskiy¹, A. I. Danilin², S. A. Danilin²

¹AvtoVAZ, Tolyatti, Russia

²Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University), Samara, Russia

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.

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

Информация об авторах

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

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

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

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

Danilin Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, associate professor at chair of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (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.

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