

**ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЛОПАТОК
ТУРБОАГРЕГАТОВ, ОСНОВАННОГО НА НЕЛИНЕЙНОЙ
АППРОКСИМАЦИИ СИГНАЛОВ ПЕРВИЧНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

А.Ж. Чернявский, С.А. Данилин, Е.Е. Дудкина
«Самарский национальный исследовательский университет имени
академика С.П. Королева», г. Самара

Ключевые слова: турбоагрегат, диагностика, нелинейная аппроксимация, целевая функция.

Обеспечение высокой эксплуатационной надежности и увеличение ресурса турбоагрегатов – газотурбинных двигателей (ГТД) и паровых турбин является важной проблемой современного машиностроения [1–3]. Наиболее ответственными деталями турбоагрегатов являются лопатки компрессоров и турбин, работающие в сложных эксплуатационных условиях больших знакопеременных нагрузок, экстремальных температур, эрозионных и коррозионных воздействий. Для обеспечения эксплуатации турбоагрегатов по техническому состоянию и предотвращения аварийных ситуаций необходимо контролировать состояние лопаток в процессе работы.

Несмотря на все принимаемые меры, в эксплуатации возникают аварийные ситуации, связанные с поломкой лопаток, которые выводят турбоагрегат из строя на длительное время.

Известны различные методы и средства диагностики и контроля деформационного состояния лопаток эксплуатируемых турбоагрегатов [1–3]. Среди этих методов выделяется бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), позволяющий определять индивидуальное состояние и параметры перемещений каждой лопатки рабочего колеса турбоагрегата.

Авторами предложен новый метод определения параметров колебаний [2], защищенный патентами на изобретение Российской Федерации № 2584723 [4] и США № 9810090 [5], в котором параметры динамических перемещений контролируемых лопаток оцениваются по степени различия формы импульсов первичного преобразователя (ПП), формируемых динамически нагруженной (колеблющейся) и ненагруженной лопатками. Параметры колебаний торца лопатки – амплитуда, частота и начальная фаза – определяются непосредственно по результатам анализа изменений формы информационного сигнала ПП. Достоинством метода является возможность определения параметров колебаний лопаток за 1–2 оборота лопаточного колеса.

Исследуемый метод [2, 4–7] реализован с использованием методов нелинейной аппроксимации, суть которых в нахождении параметров $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ аналитического выражения – аппроксимирующей функции $f_a(t_m, \alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)$, удовлетворяющих заданному критерию оптимальности. В качестве исходных данных для аппроксимации используются значения сигнала $s(t_m)$ ПП от колеблющейся лопатки в моменты времени t_m . Через данные отсчеты сигнала требуется провести аппроксимирующую функцию f_a таким образом, чтобы отклонение аппроксимирующей функции от исходных отсчетов сигнала было минимальным. Таким образом, задача нахождения параметров аппроксимирующей функции может быть интерпретирована как задача оптимизации (минимизации) целевой функции.

Среди нескольких функций, удовлетворяющих критерию оптимальности, наилучшей является та, для которой квадратическая погрешность аппроксимации минимальна:

$$f(\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n) = \sum_{m=1}^M [s(t_m) - f_a(t_m, \alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)]^2 = \min, \quad (1)$$

где $s(t_m)$ – отсчеты сигнала ПП в m -е моменты времени; $f_a(t_m, \alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)$ – аппроксимирующая функция; M – количество отсчетов сигнала.

Применительно к задаче определения параметров динамических перемещений лопаток искомыми параметрами $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ будут, соответственно, амплитуда A , частота ω_n и начальная фаза φ колебаний лопаток. В этом случае для информационного сигнала вихретокового ПП целевую функцию оптимизации можно записать в виде:

$$F(A, \omega_n, \varphi) = \sum_{m=1}^M \left[s(t_m) - \exp \left(-\frac{1}{2\alpha_t^2} \left(t_m + \frac{A}{R\omega_n} \sin(\omega_n t_m + \varphi) \right)^2 \right) \right]^2. \quad (2)$$

Поиск минимума целевой функции (2) и нахождение параметров динамических перемещений лопаток A , ω_n , φ производится численными методами решения оптимизационных задач. Подробное описание алгоритма решения рассматриваемой оптимизационной задачи приведено в [6, 7].

Тем не менее, при решении оптимизационной задачи (2) установлено [2], что имеются решения (значения параметров A , ω_n , φ), которые, будучи оптимальными в смысле минимума целевой функции, не являются оптимальными с экспертной точки зрения, т.е. дают неправильные результаты. Исследование таких субоптимальных решений показало, что причиной их появления является наличие множества локальных минимумов [2].

Для выделения из нескольких субоптимальных решений, оптимального как в смысле минимума целевой функции, так и с экспертной точки зрения, авторы предлагают выполнять решение оптимизационной задачи с использованием дополнительного условия, которое может быть сформировано на основе:

- условий проверки реализуемости механической колебательной системы;
- известных колебательных характеристик лопатки;
- анализа временных интервалов между импульсами информационного сигнала ПП контролируемой лопатки через один или несколько оборотов лопаточного колеса.

Учитывая относительную простоту аппаратной и вычислительной реализации, предлагается использовать дополнительное условие сравнения аппроксимированного сигнала с определенными параметрами колебаний лопатки на первом обороте лопаточного колеса (с найденными по результатам аппроксимаций параметрами) с информационным сигналом ПП на следующем обороте. Уравнение информационного сигнала вихрегокового ПП от контролируемой лопатки через один оборот лопаточного колеса:

$$s_{gT} = s_g(t - T) = \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \cdot \left(t - T + \frac{A}{R\omega_k} \sin(\omega_t t + \varphi)\right)^2\right), \quad (3)$$

где T – период вращения лопаточного колеса.

Тогда дополнительное условие для проверки найденных решений и нахождения оптимального решения можно записать в виде:

$$F_T(A, \omega_t, \varphi) = \sum_{m=1}^M \left[s_g(t_m - T) - \exp\left(-\frac{1}{2a_t^2} \left(t_m - T + \frac{A}{R\omega_k} \sin(\omega_t t_m + \varphi)\right)^2\right) \right]^2. \quad (4)$$

Анализ современной научно-технической литературы показывает, что эффективным способом является использование модифицированной методом множителей Лагранжа целевой функции, обеспечивающим нахождение решения за меньшее число итераций [2]. В этом случае, модифицированная методом множителей Лагранжа целевая функция с учетом дополнительного условия может быть записана в виде:

$$F_{\Sigma}(A, \omega_t, \varphi) = F(A, \omega_t, \varphi) + \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot F_T(A, \omega_t, \varphi), \quad (5)$$

где $\lambda_j = \lambda(A, \omega_t, \varphi)$ – множители Лагранжа.

Имитационное моделирование разработанного преобразователя, выполненное исследуемым методом с использованием целевой функции вида (5) в вычислительной среде MATLAB, подтвердило нахождение оптимального решения, имеющего минимальное значение целевой функции, которое также является оптимальным и с экспертной точки зрения.

Список использованных источников

1. Данилин А.И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами. Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2008. 218 с.

2. Чернявский А.Ж. Дискретно-фазовые преобразователи динамических перемещений лопаток для систем управления турбоагрегатов : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. Самара: Самар. нац. исслед. ун-т им. акад. С.П. Королева, 2018. 178 с.

3. Грецков А.А. Доплеровские преобразователи перемещений элементов вращающихся узлов турбоагрегатов : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. Самара: Самар. нац. исслед. ун-т им. акад. С.П. Королева, 2016. 147 с.

4. Патент на изобретение 2584723 Российская Федерация, МПК G01H 11/06. Способ определения параметров колебаний лопаток вращающегося колеса турбомашин и устройство для его осуществления. Данилин А.И., Чернявский А.Ж., Данилин С.А. и др., заявитель и патентообладатель Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С.П. Королева. Заявл. 03.02.2015, опубл. 20.05.2016, бюл. № 14.

5. Патент на изобретение 9810090 США, МПК H01L 21/00. Method for determining the oscillation parameters of turbo-machine blades and a device for putting the same into practice. Danilin A.I., Chernyavskij A.Zh., Danilin S.A. et al. Applicant and Assignee: Samara State Aerospace University. Priority date 3.02.2015, patent date 7.11.2017.

6. Чернявский А.Ж., Данилин С.А. Алгоритм оценки помехоустойчивости способа определения параметров колебаний лопаток турбоагрегатов на основе нелинейной аппроксимации сигналов первичных преобразователей //Известия Самар. науч. центра РАН. – 2016. - Том 18, № 4. – С. 161-165.

7. Чернявский А.Ж., Данилин А.И., Прохоров С.А., Данилин С.А. Точность определения параметров колебаний лопаток турбомашин при использовании нелинейной аппроксимации сигналов первичных преобразователей //Измерительная техника, 2017. № 11. с. 41-45.

Чернявский Аркадий Жоржевич, кандидат технических наук, инженер кафедры радиотехники. E-mail: ark@vaz.ru.

Данилин Сергей Александрович, старший преподаватель кафедры радиотехники. E-mail: sad1st07@yandex.ru.

Дудкина Елена Евгеньевна, аспирант кафедры радиотехники.

E-mail: staku@rambler.ru

УДК 620.179.18: 21.389: 681.2

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ВНУТРИВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ

И.Л. Борисенков¹, Г.И. Леонович¹, К.Е. Воронов², А.М. Телегин², В.Н. Захаров²

¹ Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Москва

² «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Пластическая деформация и разрушение твердых тел сопровождаются генерацией в широкой полосе частот акустической и в ряде случаев электромагнитной эмиссии. Акустические методы контроля реагируют не столько на прочность, сколько на плотность, пористость,