

$$\int_0^{1-\Delta\xi} \left( 1 + \left( \frac{dq(z)}{dz} \right)^2 \right) dz = 1,$$

где  $q(z)$  - уравнение изгибной линии,  
 $\Delta\xi$  - относительная величина увеличения зазора.

Измеряя с помощью радиоволнового канала величину зазора в моменты, соответствующие экстремальным значениям изгиба лопатки, и сравнивая с расчётными значениями, можно судить о форме колебаний лопатки.

#### Список использованных источников

1. Заблочкий, И.Е. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин [Текст] / И.Е. Заблочкий, Ю.А. Коростелев, Р.А. Шипов. – М.: «Машиностроение», 1977. - 160 с.
2. Данилин, А.И. Схемотехнические особенности получения автодинного сигнала в преобразователях параметров перемещений элементов вращающихся узлов турбоагрегатов / А.И. Данилин, А.А. Грецов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева. – 2014. – №2(44). – С. 30-34.

УДК 531.781.2 (088.8)

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АППРОКСИМАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА ВИХРЕТОКОВОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГАУССОВЫМ ИМПУЛЬСОМ**

А.Ж. Чернявский, С.А. Данилин, Е.Е. Дудкина

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

**Ключевые слова:** турбоагрегат, диагностика, аппроксимация, гауссовый импульс.

Основной безопасной эксплуатации турбоагрегатов является увеличение надежности и ресурса лопаток турбоагрегатов – газотурбинных двигателей (ГТД) и паровых турбин, что обуславливает потребность в информации об их фактическом состоянии в нагруженном состоянии.

Среди известных методов и средства диагностики и контроля деформационного состояния лопаток эксплуатируемых турбоагрегатов [1–5] выделяется бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), позволяющий определять индивидуальное состояние и параметры перемещений каждой лопатки рабочего колеса турбоагрегата.

В классических реализациях ДФМ измеряют временные интервалы между моментами прохождения лопаток относительно 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 [1–3]. Затем полученные значения параметров интерпретируют в области механических напряжений и деформаций [1–3].

В процессе работы турбоагрегата колебания лопаток, как собственные, так и вынужденные, приводят к неравномерности скорости прохождения лопаток около датчика, что приводит к искажению формы информационного сигнала.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований дискретно-фазового преобразователя (ДФП) динамических перемещений лопаток, предназначенного для проверки основных положений разработанной математической модели информационного сигнала ПП. Исследования проводились на экспериментальной установке, основными составляющими частями которой являются специально изготовленное образцовое лопаточное колесо и имитатор колебаний лопаток. Экспериментальная установка подробно описана в [6].

Во время эксперимента исследована возможность аппроксимации информационного сигнала ПП гауссовым импульсом при отсутствии колебаний лопаток.

Вихрековый ПП генерирует импульс колоколообразной формы при прохождении ненагруженной лопатки в зоне его видимости, который может быть описан выражением для гауссова импульса [7]. Необходимо экспериментально определить возможность аппроксимации информационного сигнала ПП гауссовым импульсом при отсутствии колебаний лопаток, получить количественные оценки качества аппроксимации экспериментально полученных сигналов гауссовой моделью.

При проведении экспериментальных исследований частота вращения лопаточного колеса составляла 1800 об/мин, имитатор колебаний лопаток выключен. Первичная аппаратная низкочастотная фильтрация и аналого-цифровое преобразование выполнялись с помощью исследуемого преобразователя, последующая аппроксимация – на ПЭВМ в среде MATLAB. На рисунке 1 графически представлены экспериментально полученные информационные сигналы лопаточного ПП от трех смежных лопаток и их гауссовская аппроксимация.

Аппроксимация экспериментально полученных сигналов выполнялась в среде MATLAB раздельно для каждого импульса от трех смежных лопаток с использованием стандартной процедуры гауссовской аппроксимации по формуле:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{N_d} A_{gn} \exp\left(-\frac{(t-\tau_n)^2}{2a^2}\right) \cdot 1(t_n \leq t \leq t_{n+1}),$$

где  $n=1 \dots N_d$  – номер лопатки;  $N_d$  – количество лопаток в лопаточном колесе;  $A_{gn}$  – амплитуда импульса первичного преобразователя от  $n$ -й лопатки;  $\tau_n = \tau_1 + (n-1)T/N_d$  – смещение импульса  $n$ -й лопатки во временной области от оборотной метки;  $T$  – период вращения лопаточного колеса;

$$1(t_n \leq t \leq t_{n+1}) = \begin{cases} 1, & \text{если } t_n \leq t \leq t_{n+1} \\ 0, & \text{если } (t < t_n \text{ или } t > t_{n+1}) \end{cases} \quad \text{– единичная функция;}$$

$t_n = \tau_1 + (n-1,5)T/N_d$ ,  $t_{n+1} = \tau_1 + (n-0,5)T/N_d$  – нижняя и верхняя временные границы импульса от  $n$ -й лопатки, соответственно.

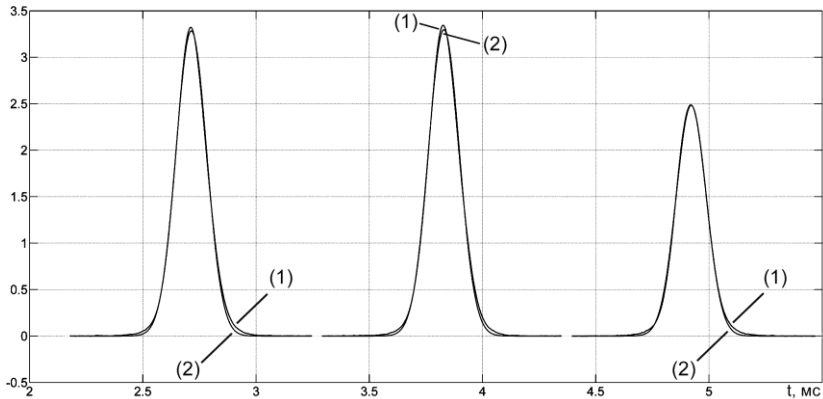


Рисунок 1 – Информационные сигналы лопаточного ПП от трех смежных лопаток (1) и их гауссовская аппроксимация (2)

Количественные результаты аппроксимации сигналов лопаточного ПП для трех рассматриваемых лопаток и статистики качества приближения представлены в таблице 1.

Качество аппроксимации экспериментально полученных сигналов гауссовой моделью может быть оценено величиной приведенного среднего квадратического отклонения (СКО) ошибки аппроксимации. Для анализируемых экспериментальных импульсов от рассмотренных лопаток получены значения приведенного СКО ошибки аппроксимации, равные 0.15, 0.057 и 0.24 % соответственно, что подтверждает высокое качество аппроксимации сигнала гауссовой моделью.

Таблица 1 – Результаты аппроксимации сигналов лопаточного ПП и статистики качества приближения

Результат аппроксимации / статистика качества приближения	Лопатка 1	Лопатка 2	Лопатка 3
$A_{gn}$ , В	3,28	3,29	2,48
$\tau_n$ , мс	2,71	3,83	4,92
$a$ , мкс	67,58	68,09	66,46
СКО ошибки аппроксимации $\sigma_{анпр}$ , В	$4,88 \cdot 10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$5,96 \cdot 10^{-3}$
Приведенное СКО ошибки аппроксимации, $\sigma_{анпр} / A_{gn}$ , %	0,15	0,057	0,24

Анализ графических представлений экспериментальных сигналов и их гауссовых аппроксимаций, приведенных на рисунке 1, также подтверждает хорошее приближение сигналов рассматриваемой моделью.

#### Список использованных источников

1. Данилин А.И., Адамов С.И., Чернявский А.Ж. Диагностика и контроль рабочего состояния лопаток паровых турбин // Электрические станции. – 2007. - № 7. – С. 19-25.

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

3. Данилин А.И., Чернявский А.Ж. Критерии дискретно-фазового контроля рабочего состояния лопаток и их реализуемость в системах автоматического управления турбоагрегатами // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С.П. Королёва. – 2009. № 1(17). – С. 107-115.

4. 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. Королёва, 2018. 178 с.

5. 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. Королёва. Заявл. 03.02.2015, опубл. 20.05.2016, бюл. № 14.

6. Чернявский А.Ж., Данилин С.А., Дудкина Е.Е. Экспериментальное исследование метода определения параметров колебаний лопаток, основанного на нелинейной аппроксимации сигналов первичных преобразователей // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: ООО «Офорт», 2018. – С. 92-94.

7. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.

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 004.624

## РЕАЛИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ESP32

С.Д. Омельченко, А.А. Берестинов  
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

**Ключевые слова:** микроконтроллер, Wi-Fi, ESP32, диспетчеризация, термодатчик, 1-wire.

В настоящее время в системах диспетчеризации зданий начинают активно использоваться беспроводные протоколы передачи данных. Одним из наиболее популярных протоколов, является Wi-Fi, точка доступа есть практически в каждом помещении, следовательно, при использовании беспроводных датчиков уменьшатся расходы на монтаж проводных сетей.

Целью данной работы является разработка беспроводного термодатчика, для систем диспетчеризации зданий.

Для решения данной задачи используется микроконтроллер ESP32, имеющий встроенный Wi-Fi 802.11b/g/n/e/l и Bluetooth v4.2, при этом обладающий низким энергопотреблением. [1]

На базе выбранного микроконтроллера была собрана экспериментальная установка, изображенная на рисунке 1.



1 – микроконтроллер, 2 – термодатчики.

Рисунок 1 – Экспериментальная установка для беспроводной передачи данных с датчика температуры