

# Интеллектуальная система контроля температуры лопаток турбин при отсутствии синхронизирующих импульсов

А.Р. Гумеров

Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
Уфа, Россия  
e-mail: radx0306@gmail.com

В.Х. Ясовеев

Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
Уфа, Россия  
e-mail: yasov@mail.ru

## Аннотация<sup>1</sup>

Рассмотрена интеллектуальная система контроля температуры лопаток турбин, основанная на оптическом пирометрическом преобразователе при отсутствии синхронизирующих импульсов от датчика положения ротора. Описаны проблемы, присущие таким системам и пути их решения. Рассмотрена структура интеллектуальной системы, её возможности. Приводятся алгоритмы обработки сигнала, примененный математический аппарат. Показаны входные данные и результаты обработки, рассчитана сложность вычислений.

## 1. Введение

В условиях повышения топливной эффективности лопаточных машин происходит рост температуры газа перед турбиной  $T_c$ . В таких условиях необходим анализ температурного состояния рабочих лопаток ротора турбины. Рабочие лопатки турбин работают при высоких температурах, испытывают большие статические, вибрационные и температурные напряжения. Учитывая тяжелые условия работы рабочих лопаток и их роль в двигателе [1], применение оптических пирометрических преобразователей (ОПП) является практически безальтернативным способом диагностики температурного состояния турбин лопаточных машин благодаря бесконтактному и безынерционному преобразованию тепловой энергии излучаемой рабочими лопатками. Жесткие условия эксплуатации турбины делают невозможным применение термодатчиков для измерения температуры лопаток, т.к. ресурс термодатчиков становится крайне малым.

Излучение, визируемое объективом, передается по оптическому волокну, снабженному металлизированной оболочкой, в электронный блок,

где происходит преобразование излучения в электрический ток в фотоприемном устройстве, усиление слабых сигналов и оцифровывание в микроконтроллере. Во избежание покрытия копотью линзы объектива, происходит обдув объектива воздухом из-за компрессора.

Оптическая ось ОПП ориентирована на поверхность контролируемой лопатки, преобразуя излучение фотоприемником в электрический ток по формуле:

$$I_{ОПП(\varepsilon)}(T) = G \cdot S_{\lambda_{\max}} K_c \cdot \sum_{i=1}^n b(\lambda_i T) \Psi(\lambda_i) \Delta \lambda, (1)$$

где  $G$  – коэффициент пропорциональности, связанный с геометрическими факторами;  $b(\lambda_i T)$  – спектральная плотность энергетической яркости, излучаемой моделью абсолютно черного тела (АЧТ);  $\Psi(\lambda_i)$  – относительная спектральная чувствительность фотодиода;  $S_{\lambda_{\max}}$  – монохроматическая чувствительность фотодиода в максимуме характеристики относительной спектральной чувствительности;  $\varepsilon(\lambda T)$  – излучательная способность излучающей полости модели АЧТ;  $K_c$  – коэффициент, связанный с пропусканием элементов оптического тракта.

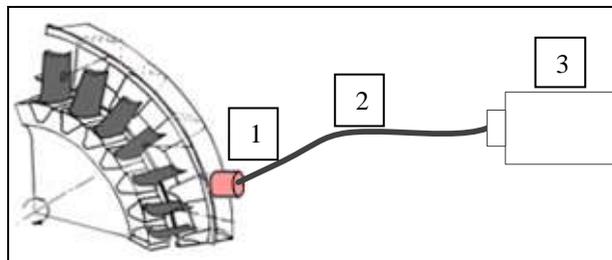


Рис. 1. Схема расположения ОПП на турбине

1. Объектив
2. Световод с металлизированным волокном
3. Электронный блок ОПП

Труды второй международной конференции  
"Интеллектуальные технологии обработки  
информации и управления", 10 - 12 ноября, Уфа,  
Россия, 2014

Схема расположения ОПП показана на рисунке 1. Наличие на турбине индукционных, токовихревых или других датчиков положения ротора (ДПР) является необходимым условием для использования всех возможностей ОПП, позволяя:

1. Точно совмещать зоны поверхностей лопаток и участки сигналов, идентифицируя тепловую картину лопаток.
2. С большой точностью определять частоту вращения ротора.

Наряду с оптико-электронными системами контроля пламени[2], интеллектуальная система, основанная на ОПП, позволяет диагностировать предпомпажное состояние.

## 2. Постановка задачи

Без ДПР несколько ограничиваются возможности ОПП. Система уже оперирует не «физическими», а «виртуальными» номерами лопаток на роторе, присвоенными им самим же в ходе работы. Из-за этого невозможно точно определить дефектную лопатку при разборе турбины.

Для диагностики температурного состояния лопаток без ДПР необходимо чтобы набор «виртуальных» номеров не менялся в ходе различных запусков газотурбинной техники. В отечественной аналоговой технике обработки пирометрического сигнала применялась синхронизация по наиболее горячей лопатке. Анализируя сигнал пирометра, выделяется лопатка с наиболее высокой температурой, которой присваивается «виртуальный» номер «1». Указанный способ присваивания номеров лопаткам для анализа температуры отдельных лопаток не всегда пригоден, т.к. после резких эволюций двигателя, сопровождающихся мощными выбросами из камеры сгорания, или после его перезапуска другая лопатка может стать наиболее горячей. Современные световодные ОПП детектируют излучение  $t$  лопаток, разогретых до температуры более  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  (потенциально более  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), не фиксируя излучение лопаток на выключенном двигателе.

## 3. Решение задачи

Основой для применения диагностических возможностей, описанных в данной статье, лежит температурный портрет ротора турбины. С каждым запуском на одном и том же режиме работы двигателя общий температурный профиль турбины сильно не изменяется, что показано на рисунке 2.

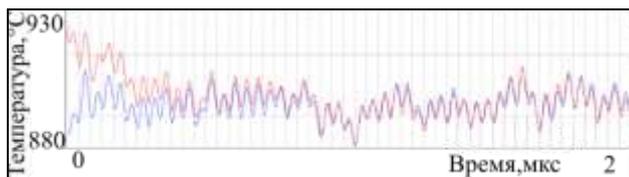


Рис. 2. Совмещение сигналов ОПП, полученных во время разных запусков двигателя.

Изменяется максимальная температура только групп лопаток, что даёт возможность совмещать сигнал на

протяжении всего цикла измерений температуры турбины изделия даже после помех от камеры сгорания. Основным инструментом для сдвига в нужное положение температурного профиля турбины, служат корреляционный анализ. Алгоритм обработки сигнала приведён на рисунке 3.



Рис. 3. Алгоритм обработки сигнала

Имеем 2 сигнала ОПП, записанных на разных режимах во время разных запусков на одном из изделий:  $x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_n$

Универсальным средством для определения частоты сигнала является дискретное преобразование Фурье (ДПФ):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, \quad (2)$$

где  $W_N$  - настроечный параметр. Для значительного сокращения времени расчёта  $X(k)$  применим алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), вычисляемого «бабочкой»[4].

До вычисления БПФ, применим выделяющее окно, т.к. разрывы, образующиеся в конечных точках выборки сигнала, приводят к расширению частотного спектра анализируемого сигнала из-за появления дополнительных гармоник. В дополнение к появлению боковых лепестков, происходит расширение основного лепестка, что приводит к снижению разрешающей способности по частоте[5]. Применив к участкам оцифрованных сигналов ОПП преобразование Фурье, получаем массив значений  $f_1 \dots f_{n/2}$ , соответствующих представлению сигнала в частотной области спектра. Частотное представление сигнала ОПП представлено на рисунке 4. Предпомпажное состояние диагностируется пирометром путем сравнения спектральных плотностей мощности (СПМ) в области низких и средних частот. При доминировании СПМ в области низких частот на определенное значение, происходит выдача команды «помпаж». Обнаружив элемент с максимальным значением, находим лопаточную частоту вращения  $\nu_d$ :

$$v_l = v_{adc} \frac{i_{max}}{2N}, \quad (3)$$

где  $v_{adc}$  - частота дискретизации АЦП,  $i_{max}$  - индекс массива частотного представления с максимальным значением,  $N$  - количество точек в массиве. Лопаточная частота – это произведение числа лопаток на частоту вращения вала двигателя, на котором установлено рабочее колесо. Зная (3), найдём частоту вращения вала двигателя  $v_p$ :

$$v_p = \frac{v_l}{N_l}, \quad (4)$$

где  $N_l$  – количество лопаток, установленных на исследуемой турбине.

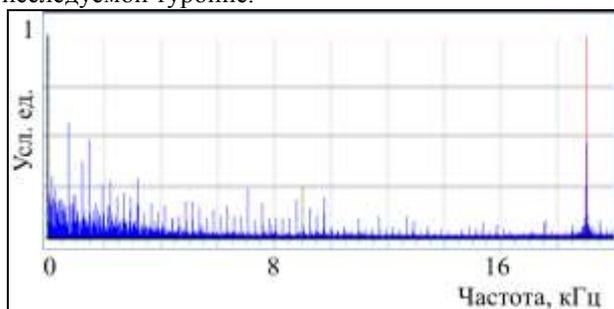


Рис. 4. Частотное представление сигнала ОПН.

Зная количество лопаток в рабочем колесе турбины, частоту вращения турбины и частоту дискретизации АЦП  $v_{adc}$ , определим количество точек, соответствующих одному обороту ротора.

$$N = N_l \frac{v_l}{v_{adc}}. \quad (5)$$

Разбив сигнал на обороты, избавимся от помех в сигнале, вызванных мощными выбросами из камеры сгорания, путем нахождения среднего арифметического  $x_i$  по  $n$  оборотам:

$$x_i = \left( \sum_{i=1}^n z_i \right) / n, \quad (6)$$

где  $z_i$  - один из  $n$  усредняемых оборотов. Сигнал ОПН за один оборот показан на рисунке 5.

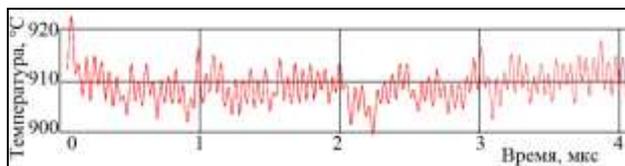


Рис. 5. Сигнал ОПН за один оборот

Чтобы иметь возможность сравнивать сигналы независимо от частоты сигналов, записанных на разных режимах или в разное время, нужно оперировать наборами максимальных температур каждой лопатки. Необходимо составить графики

максимальных температур по каждой лопатки в обороте  $T_i$ , показанные на рисунке 6.

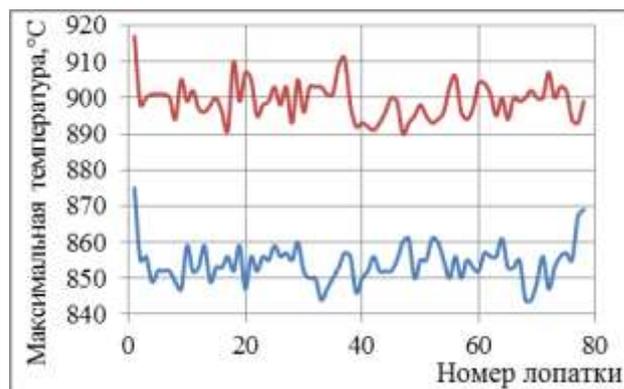


Рис. 6. Максимальные температуры лопаток на разных запусках.

Для измерения степени сходства между смещенными экземплярами двух разных сигналов [3], применим взаимную корреляционную функцию  $k_i$ :

$$k_i = \sum_{j=1}^{N_l} x_i y_{i+j}, \quad (7)$$

где  $x_i$  - элемент набора максимальных температур первого сигнала,  $y_{i+j}$  - элемент набора максимальных температур второго сигнала. Получим массив коэффициентов корреляции  $k_1 \dots k_n$ . Индекс элемента с наибольшим значением коэффициента корреляции и будет значением, на которое нужно сдвинуть анализируемый сигнал. Результат корреляционного анализа показан на рисунке 7. Значение коэффициента корреляции с наибольшим значением отличается не менее чем на 65% от всех прочих.

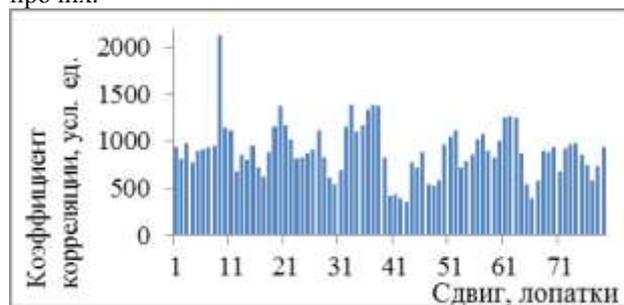
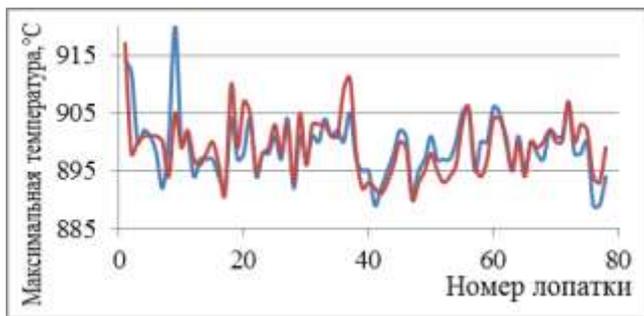


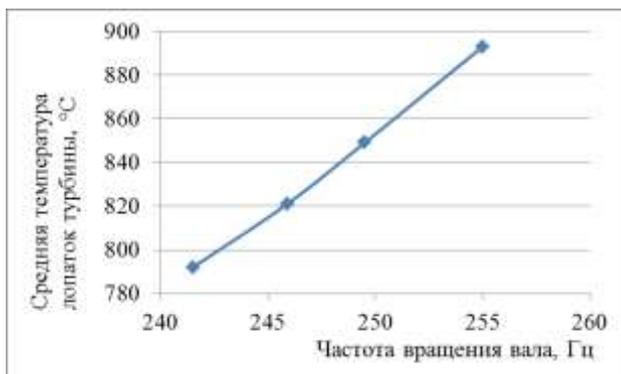
Рис. 7. Коэффициенты корреляции, полученные с сигналами на разных запусках двигателя

На рисунке 8 представлен результат наложения графиков максимальных температур лопаток после сдвига сигналов друг относительно друга.



**Рис. 8. Совмещение наборов максимальных температур, записанных во время разных запусков.**

Система определяет, что произошло с температурным портретом турбины, анализируя сигналы. Если анализ производится на одинаковых режимах, то формируется массив разности максимальных температур лопаток. При анализе сигналов, полученных на разных режимах работы двигателя, необходимо приведение сигналов к единому формату. Система имеет представление о соответствии средней температуре турбины частоте вращения вала, показанного на рисунке 9.



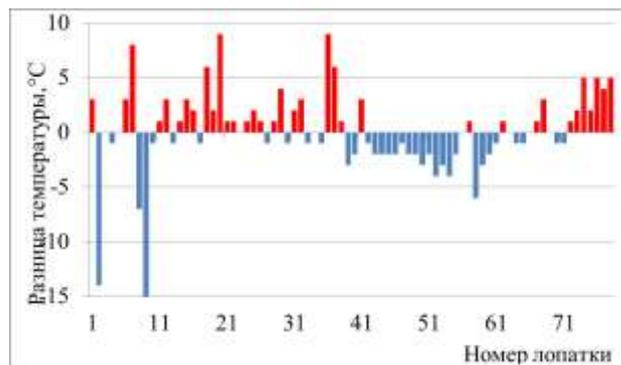
**Рис. 9. Зависимость средней температуры лопаток турбины от частоты вращения вала.**

Во время записи характеристики двигателя, разница между максимальной и минимальной температуры составляла порядка 13°C, отличаясь на разных режимах не более чем на 1 градус. Из этого следует, что нет необходимости масштабировать сигналы при сравнении максимальных температур на разных режимах. Необходимо только произвести смещение сигналов по температуре. Следовательно, алгоритм сравнения двух сигналов будет выглядеть следующим образом:

1. Вычисление средних значений обоих сигналов.
2. Смещение одного сигнала к другому на величину разности средних значений.
3. Формирование массива разностей температур, что показано на рисунке 10.

В случае значительных различий в разнице максимальных температур на различных режимах,

производится масштабирование сигналов для приведения их к единому формату.



**Рис. 10. Гистограмма изменения температур во время разных запусков.**

Сложность вычисления алгоритма корреляционного анализа равна  $O(f(n^2))$ . Для реализации алгоритма, необходимо  $2N$  сравнений и  $N^2$  произведений целых чисел. Среди прочих требований к аппаратной части, для точного совмещения набора лопаток, необходимо сохранять тепловой портрет турбины на каждом запуске во внутренней памяти. Данный метод даёт надёжный инструмент для сопоставления сигналов ОПП при анализе без ДПР и пригоден в использовании в микроконтроллерах.

**Заключение.** В работе описана интеллектуальная система контроля температурного состояния рабочих лопаток турбины ГТД с оригинальным способом уменьшения влияния от отсутствия синхронизирующих импульсов, позволяющего более полно анализировать температурное состояние лопаток турбины.

### Список используемых источников

1. Б.А. Чичиков Рабочие лопатки авиационных ГТД. Часть 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток. Учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2000, 74 с.
2. А.Р. Гумеров, В.Х. Ясоевев Анализ и методы идентификации одномерных сигналов интеллектуальной оптико-электронной системы контроля процессов горения в камерах сгорания газотурбинной техники. "Авиакосмическое приборостроение", №11 2013, с. 41-49.
3. А.Б. Сергиенко Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
4. Солонина А.И., Улахович Д.А., Яковлев Л.А. Алгоритмы и процессы цифровой обработки сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
5. Э. С. Айфичер, Б.У. Джервис Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 992 с.