

М. А. Ураксеев, Р. А. Мунасыпов, С. В. Жернаков,
В. Ю. Чернышев, А. С. Чепайкин

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА ПИРОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛОПАТОК ГТД НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ

Описывается метод цифровой обработки сигнала с помехами различной длительности, который может быть применен для измерения температуры лопаток ГТД. *Карты Кохонена; помехи; лопатки ротора ГТД; обработка сигнала пирометра о температуре лопаток ротора ГТД*

В последние годы газотурбинные двигатели (ГТД) получают широкое применение в различных отраслях промышленности. Причиной этого являются характерные качества газотурбинного двигателя: простота тепловой и кинематической схемы, относительная простота конструкции, малая масса, приходящаяся на единицу мощности, сравнительно простая автоматизация управления. Кроме того в последние годы имеются значительные достижения как в области аэродинамики турбомашин, так и в разработке жаропрочных сталей и сплавов. Успехи аэродинамики и металлургии позволили поднять тепловую экономичность ГТД до необходимого уровня и создать предпосылки для внедрения ГТД в различные области народного хозяйства.

МЕТОД ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

Сегодня одна из важных задач, которую необходимо решить для повышения эффективности и безопасности эксплуатации газотурбинного двигателя (ГТД) является измерение и контроль температурного состояния лопаток турбины высокого давления (ТВД) ГТД. Эта задача решается с помощью бесконтактных измерителей – оптических пирометрических преобразователей (ОПП). Для решения этой задачи на современном уровне необходимо разработать метод цифровой обработки сигнала, который позволит в реальном масштабе времени записывать сигнал на цифровой носитель информации, а также получать максимальное количество информации из сигнала пирометра и визуализировать ее в удобном для пользователя виде.

На рис. 1 представлена функциональная схема цифровой системы измерения температуры лопаток ротора турбины. При работе турби-

ны на различных режимах сигнал о температуре лопаток с выхода ОПП преобразовывается в цифровой сигнал и записывается в файл на жестком диске персонального компьютера (ПК) через интерфейс USB в виде последовательности отсчетов. Затем проводится предварительная обработка с целью разделения последовательности отсчетов на участки, которые соответствуют отдельным оборотам турбины. Для этого с помощью быстрого преобразование Фурье (БПФ) с числом точек равным 2^n вычисляется частота следования лопаток f_2 , с которой лопатки проходят через область визирования пирометра.

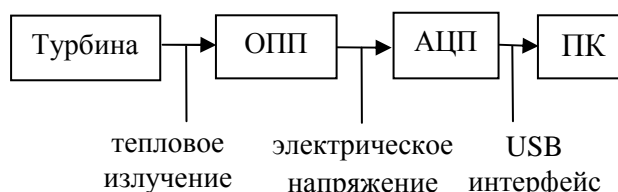


Рис. 1. Функциональная схема цифровой системы измерения температуры лопаток ротора турбины

Рассмотрим реальный сигнал ГТД оцифрованный с частотой $f_d = 400$ кГц (см. рис. 2) с частотой вращения турбины $f_1 = 1 / T_1$.

Одной из важных задач, которую необходимо решить при обработке цифрового сигнала является фильтрация помех. Использование цифровых фильтров в сигнале ОПП приводит к искажению полезной составляющей сигнала, что может быть нежелательно.

В реальном сигнале ОПП присутствуют помехи, частотный спектр которых близок или совпадает со спектром частот полезного сигнала [1, 2], они могут иметь различную амплитуду и длительность (см. рис. 3).

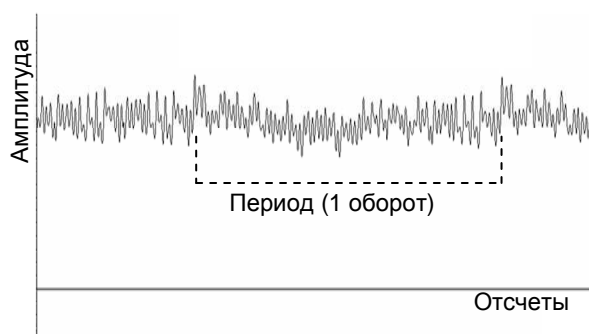


Рис. 2. Оцифрованный сигнал оптического пирометрического преобразователя

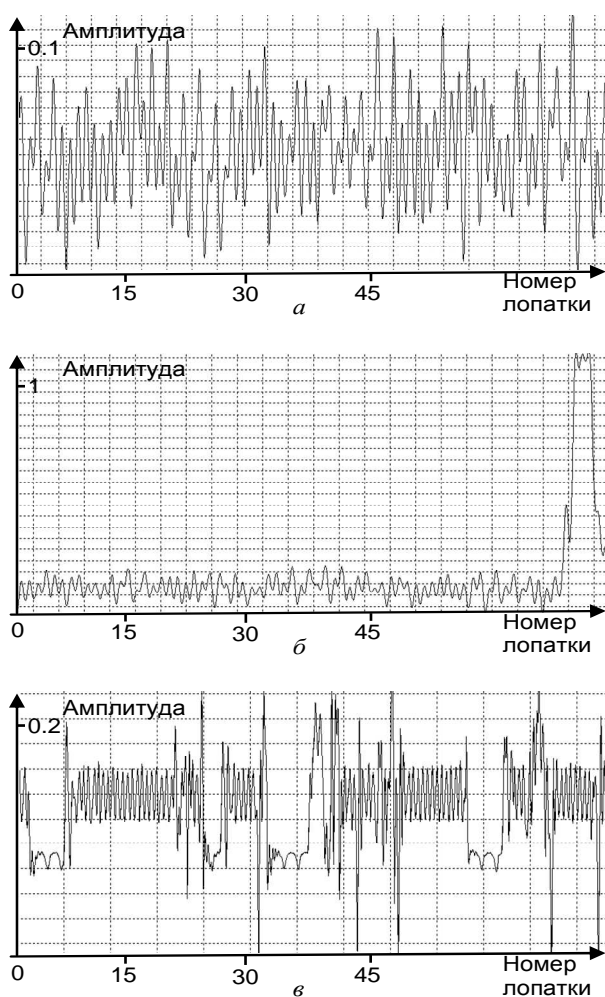


Рис. 3. Реальный сигнал температуры лопаток: *а* – без помех; *б*, *в* – с помехами различной длительности и амплитуды

Чаще всего их источником является пролетающий через область визирования ОПП поток сажевых частиц, интенсивность таких потоков может изменяться в широком диапазоне.

Для устранения описанных помех при обработке сигнала в реальном времени необходимо применять быстродействующие алгоритмы, ко-

торые позволили бы за минимальное возможное время получить распределение температуры по обороту с максимальной точностью.

Сигнал, получаемый с выхода ОПП на установившемся режиме может быть охарактеризован как случайный стационарный сигнал [3]. То же самое справедливо для переходного режима, если сигнал рассматривается на коротком промежутке времени, за которое температура лопатки изменяется на величину, меньшую, чем допустимая погрешность измерения.

Поэтому для обработки сигнала пирометра может быть предложена следующая методика.

В сигнале пирометра выделяются участки, соответствующие отдельным оборотам, с помощью алгоритмов, основанных на быстром преобразовании Фурье, описанных в [4]. Затем диапазон измеряемых температур делится на уровни квантования, для каждой лопатки находят максимумы температур по нескольким последовательным оборотам и вычисляется количество попаданий значений максимумов лопаток в каждый уровень. Поскольку амплитуда помех принимает случайные значения по нормальному закону распределения, а значения максимумов температур лопаток изменяются незначительно, то количество попаданий в уровень квантования, соответствующий температуре лопатки, будет расти быстрее, чем количество попаданий в остальные уровни. Таким образом, уровень квантования с максимальным числом попаданий за некоторое количество оборотов N будет соответствовать реальной максимальной температуре лопатки.

Количество необходимых оборотов N для определения максимальной температуры каждой лопатки зависит от степени зашумленности сигнала, которая может быть выражена через процентное соотношение длительности помех к длительности всего сигнала ($k\%$). Для получения этой зависимости была построена модель в которой сначала моделируется идеальный сигнал, соответствующий одному обороту ротора турбины, а затем на этот сигнал накладываются помехи, нормально распределенные во времени, с заранее известной величиной $k\%$. Помехи моделируются как завышение и занижение амплитуды идеального сигнала, продолжительность помехи и коэффициент, на который умножается значение отсчета полезного сигнала генерируются случайным образом с нормальным законом распределения (см. рис. 4.).

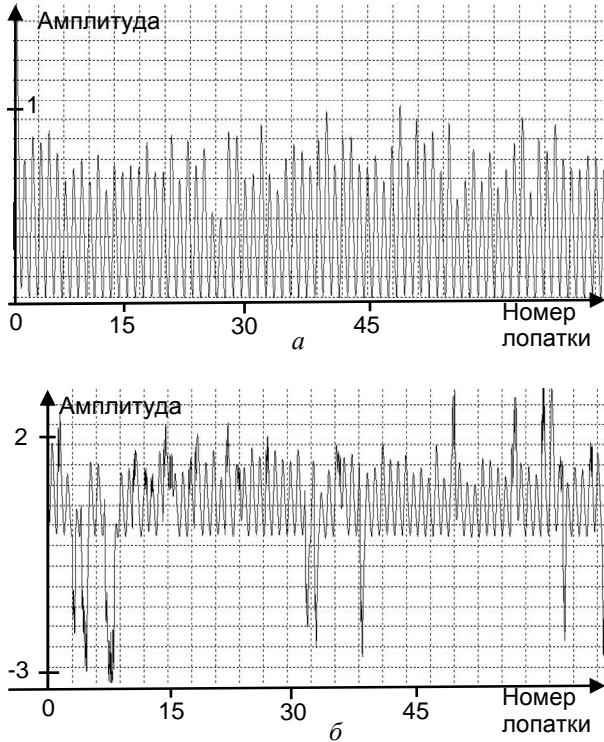


Рис. 4. Моделируемый сигнал, соответствующий одному обороту турбины: *a* – без помех; *б* – с количеством помех 20%

Чем больше $k_{\%}$, тем больше нужно оборотов для того, чтобы температура идеального сигнала совпала с вычисляемым значением уровня квантования, соответствующему максимальному числу попаданий значений максимумов моделируемого сигнала. На рис. 5 показан график зависимости количества необходимых оборотов для совпадения от $k_{\%}$.

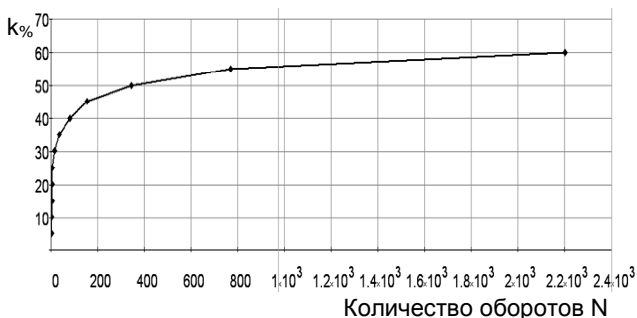


Рис. 5. Зависимость количества необходимых оборотов до совпадения от $k_{\%}$

При вероятности возникновения помех более 60% помехи в сигнале встречаются настолько часто, что участки незашумленного сигнала встречаются настолько редко, что рост числа попаданий в квантовый уровень, соответствующий

реальной температуре, происходит медленней, чем в остальные квантовые уровни и обработка данным способом становится бессмысленной. На рис. 6. показан такой сигнал.

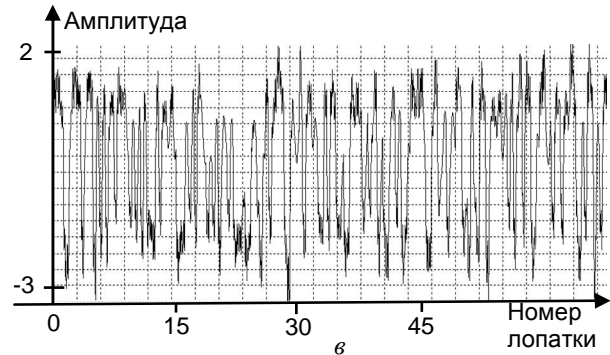


Рис. 5. Моделируемый сигнал с количеством помех 60%

Для того, чтобы знать сколько оборотов необходимо для обработки реального сигнала осуществляется кластерный анализ, что может быть показано на самоорганизующихся картах Кохонена [5].

Исходные данные для кластерного анализа представляют собой массив отсчетов цифрового сигнала размером два периода оборота турбины. Оба выделенных периода разделяются на z равных частей, каждая из которых соответствует распределению температуры на одной лопатке, таким образом получают $2z$ участков сигнала, которые можно рассматривать как кластеризируемые объекты. Для каждого объекта находят параметры, описанные в табл. 1. В результате получают обучающую выборку (см. табл. 2), которая может быть подвергнута анализу с помощью карт Кохонена, например, в программном пакете Deductor, Somap Analyzer. Чем больше количество объектов в обучающей выборке, тем точнее результат анализа, но при этом увеличивается время обработки. Для модели сигналов вполне достаточно количество объектов равное $2z$, а в бортовых это значение может достигать 5–7 z .

Таблица 1

Параметры кластерного анализа	
Параметр	Описание
T_{\max}	Максимальное значение сигнала на участке
T_{\min}	Минимальное значение сигнала на участке
T_{med}	Среднее значение сигнала на участке
Grad	Максимальный модуль производной на участке

Таблица 2

Пример фрагмента данных обучающей выборки, строки которой соответствуют кластеризуемым объектам

Tmax	Tmin	Tmed	Grad
3986	1263	2668	704
2403	1230	1970	185
5795	1034	3396	1718
5082	853	2530	1154
4142	788	2485	1174
3826	1133	2611	806
4517	997	2781	808
2458	1166	1989	307
3609	1023	2582	764
3468	1072	2115	611
4128	880	2686	987
4142	861	2199	1131
5190	1360	3253	828
3822	934	2144	958
5614	837	3157	1046
2561	1359	1968	289
4743	1533	3209	1176
3609	1014	2144	791

По обучающей выборке строятся карты, с количеством кластеров, равным 2.

На рис. 6 представлены 6 самоорганизующихся карт Кохонена, построенные по обучающей выборке сигнала с 30% помех, на которых объекты обучающей выборки разбиты на 2 кластера, граница между кластерами обозначена толстой черной линией в правом нижнем углу каждой карты.

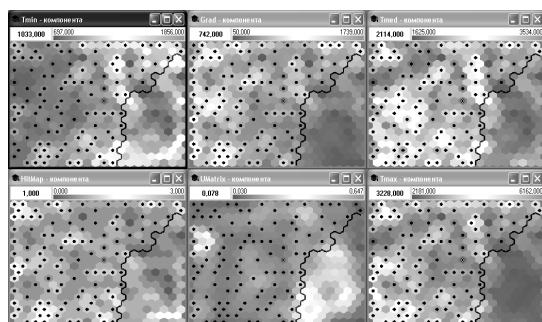


Рис. 6. Самоорганизующиеся карты Кохонена, построенные по параметрам кластеризации унифицированной матрице расстояний (Umatrix) и числу попаданий (HitMap)

Кластеры резко отличаются по величине параметров. Первый кластер – ячейки помеченные кружками, в него попали участки сигнала, которые не были искажены помехами. Второй кластер – ячейки с темным фоном, сюда попали объекты, которые соответствуют участкам сиг-

нала, искаженным помехами. Отношение суммы числа попаданий во второй кластер к количеству кластеризуемых объектов равно $2z$, будет равно процентному содержанию помех в сигнале с допустимой погрешностью в 4%. Для определения этой погрешности были проведены эксперименты: при известном содержании помех в сигнале строились карты кохонена по соответствующим выборкам и определялось процентное содержание помех в сигнале по карте HitMap (подсчитывает число попаданий в кластер). На рис. 7 показан график реального процентного содержания определяемых помех $k_{\%}$ и полученные значения процентного содержания помех $k_{\%koh}$ по карте Hitmap для разных значений.

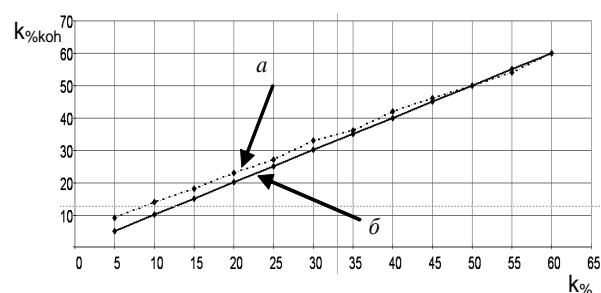


Рис. 7. Процентное содержание помех в сигнале: a – $k_{\%koh}$, полученное по карте Hitmap; b – график реального процентного содержания определяемых помех $k_{\%}$.

Как видно из графика, погрешность определения тем меньше, чем больше помех встречается в сигнале.

Таким образом, данная методика особенно хорошо подходит для реализации в бортовых условиях при работе двигателя в установившемся режиме, когда сигнал без помех является стационарным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационная технология интеграции интеллектуального пирометрического модуля в систему управления, контроля и диагностики (FADEC) ГТД / Е. В. Распопов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2010. № 38.
2. Чепайкин А. С., Чернышев В. Ю. Создание аппаратно-программного комплекса для измерения температуры лопаток ротора ГТД // Актуальные проблемы науки и техники: Сб. тр. 4-ой всероссийск. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа, 2009. С. 554–558.

3. **Токарев В. П.** Оптический пирометр в системе термометрирования ГТД // Вестник УГАТУ. 2008. № 26.

4. Методика обработки цифрового периодического сигнала произвольной формы с широкополосными помехами / М. А. Ураксеев [и др.] // Вестник УГАТУ. 2011. № 41.

5. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс изд. Диалектика, 2008. 1104 с.

ОБ АВТОРАХ

Ураксеев Марат Абдулович, проф. каф. инф.-изм. техники. Дипл. инженер-механик (Ташкентск. политехн. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по элементам и устройствам вычислительн. техники и систем управления. Иссл. в обл. волоконно-оптическ. датчиков для техн. процессов и производств.

Мунасыпов Рустэм Анварович, проф. каф. техн. кибернетики. Дипл. инженер электрон. техн. (УАИ, 1982). Д-р техн. наук по системному анализу, управлению и обработке информации (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. интеллектуальных и адаптивных систем управления сложными динамическими объектами.

Жернаков Сергей Владимирович, зав. каф. инф.-изм. техники. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1984). Д-р техн. наук по системн. анализу, управлению и обработке информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем.

Чернышев Владимир Юрьевич, асп. той же каф. Дипл. магистр по инф.-измерительн. технике и технологии (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. систем оптической пирометрии.

Чепайкин Александр Сергеевич, асп. каф. техн. кибернетики. Дипл. магистр по автоматизации и управлению (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. цифровой обработки сигналов.