

УДК 681.5

**АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА
ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛОПАТОК
РОТОРА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ*****В.Ю. Чернышев, А.С. Чепайкин**

Описывается методика цифровой обработки сигнала, позволяющая бороться с различными помехами в сигнале оптического пирометрического преобразователя, измеряющего температуру лопаток ротора газотурбинного двигателя, что позволяет повысить надежность его функционирования.

Ключевые слова: быстрое преобразование Фурье, периодический сигнал, помехи, цифровой фильтр, спектр сигнала.

Key words: Fast Fourier transformation, periodic signal, interference, digital filter, signal spectrum.

В последние годы газотурбинные установки (ГТУ) 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, имеются значительные достижения как в области аэродинамики турбомашин, так и в разработке жаропрочных сталей и сплавов. Успехи аэродинамики и металлургии позволили поднять тепловую экономичность ГТУ до необходимого уровня и создать предпосылки для внедрения ГТУ в различные области народного хозяйства.

Сегодня одна из важных задач, которую необходимо решить для повышения эффективности и безопасности эксплуатации ГТУ, – измерение и контроль температурного состояния лопаток турбины высокого давления (ТВД) ГТУ [1, 2]. В нашей стране преимущественно используются контактные измерители температуры – термопары, они имеют ряд недостатков. Методы обработки сигналов термопар дают большие погрешности. В настоящее время наблюдается тенденция перехода на бесконтактные измерители температуры – оптические пирометрические преобразователи (ОПП). На Западе разработаны программные продукты и методы для обработки таких сигналов, но они очень дороги и секрет самих методов не раскрывается.

Для решения такой задачи на современном уровне необходимо разработать методы цифровой обработки сигнала, которые позволяют в реальном масштабе времени записывать сигнал на цифровой носитель информации, а также получать максимальное количество информации из сигнала пирометра и визуализировать её в удобном для пользователя виде.

На рис. 1 представлена функциональная схема цифровой системы измерения температуры лопаток ротора турбины. При работе турбины на различных режимах сигнал о температуре лопаток с выхода ОПП преобразуется 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 по-

* Исследования по данной тематике, проводимые авторами статьи, стали возможными благодаря финансовой поддержке в рамках гранта по программе УМНИК № 7099р/9646.

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

следовательности 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 визуирования пирометра.

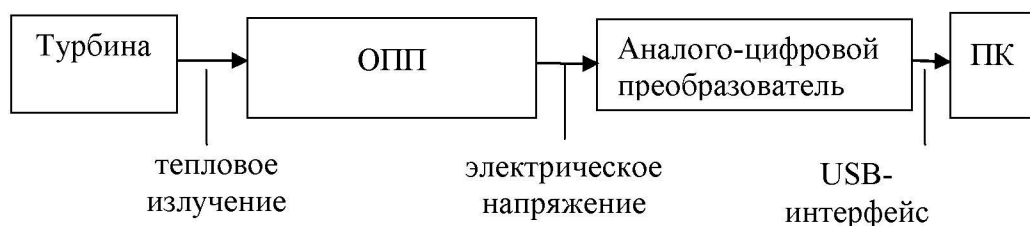


Рис. 1. Функциональная схема цифровой системы измерения температуры лопаток ротора турбины

Рассмотрим реальный сигнал ГТУ, оцифрованный с частотой $f_d = 400$ кГц (рис. 2), с частотой вращения турбины $f_1 = 1/T_1$. Несущая частота этого сигнала, соответствующая частоте следования лопаток, $f_2 = 1/T_2$. Частота f_2 связана с частотой f_1 таким образом, что $f_2/f_1 = k$, где k – известное число лопаток. Периоду T_1 соответствует число отсчетов $N = f_d/f_1$.

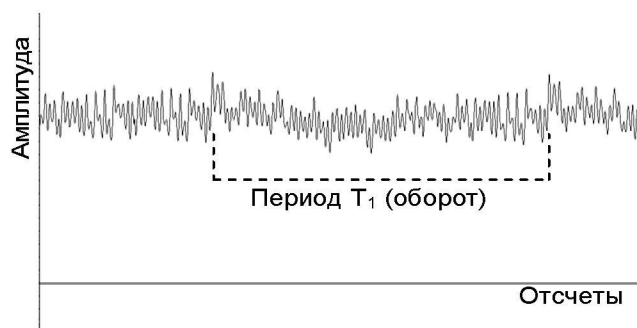


Рис. 2. Оцифрованный сигнал оптического пирометрического преобразователя

В сигнале присутствуют помехи двух типов: высокочастотные с амплитудой меньшей, чем амплитуда полезного сигнала, и частотой более 50 кГц (рис. 3), и помехи, продолжительностью не более $T_1/3$, являющиеся широкополосными.

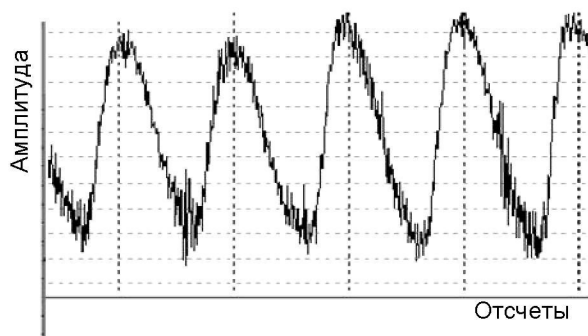


Рис. 3. Сигнал с высокочастотными помехами

Помехи первого типа устраняются с помощью цифрового фильтра Баттерворта 8-го порядка (рис. 4). Результат обработки исходного сигнала показан на рис. 5.

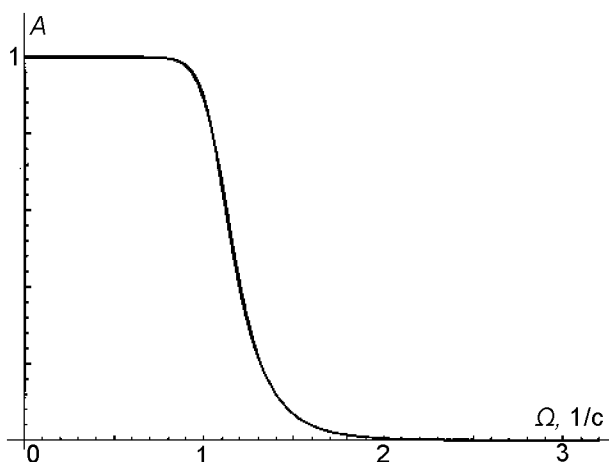


Рис. 4. График АЧХ цифрового фильтра,
где А – амплитуда, Ω – нормированная частота цифрового фильтра

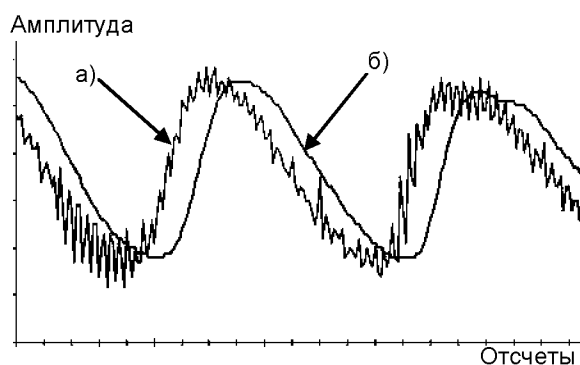


Рис. 5. Результат обработки фильтром Баттерворта:
а) исходный сигнал; б) обработанный сигнал

Помехи второго типа с помощью цифровых фильтров устранить невозможно.

На рис. 6а показан участок сигнала без помех, на рис. 6б – его частотное представление, полученное с помощью быстрого преобразования Фурье по массиву отсчетов размером 2^{15} . Для сравнения на рис. 7а представлен участок сигнала с помехами, частота которых близка к несущей частоте сигнала f_2 , превышающими по амплитуде полезную составляющую сигнала. На частотном представлении сигнала (рис. 7б) видно, что нельзя точно определить максимум, соответствующий несущей частоте, так как спектр искажен гармониками, порожденными помехой.

**ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

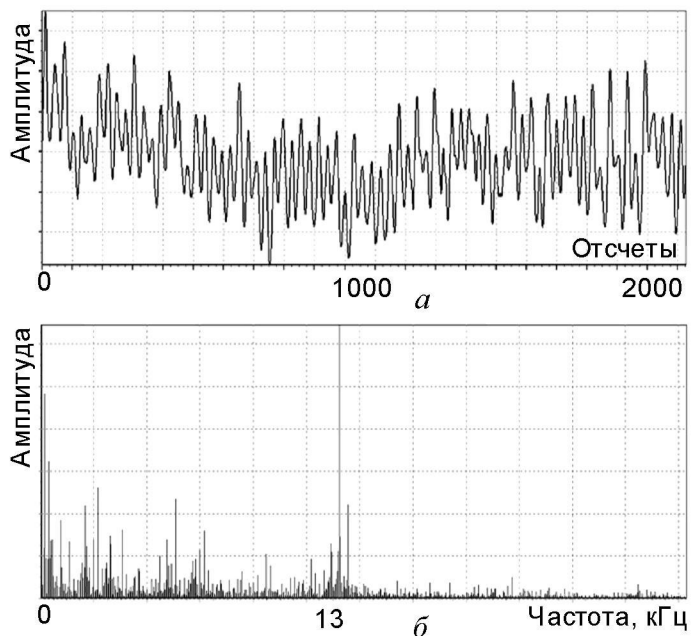


Рис. 6. Сигнал с выхода АЦП: а) участок без помех;
б) частотное представление сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье

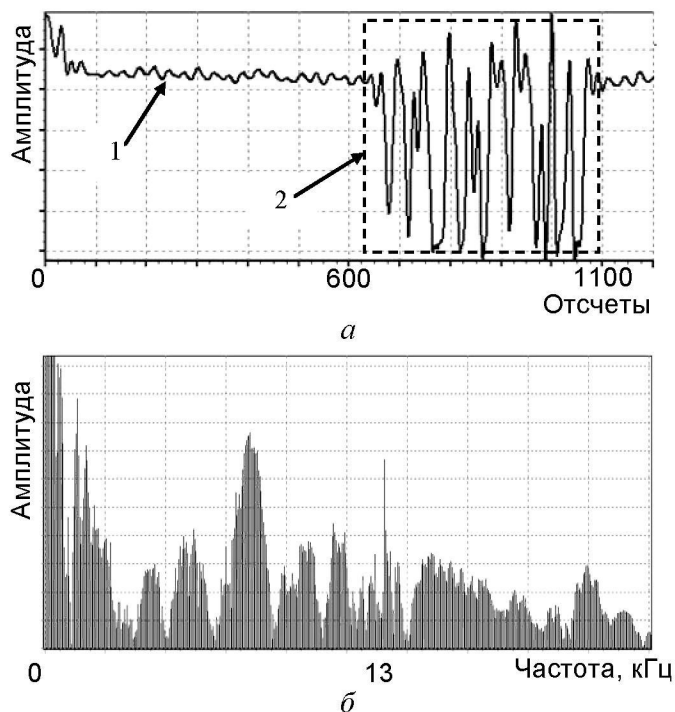


Рис. 7. Сигнал с выхода АЦП: а) участок сигнала с помехой;
б) частотное представление сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье

Так как процесс медленно меняющийся, то эти помехи можно устранять путем сопоставления периодов сигнала T_1 , соответствующих оборотам турбины, полученных один за

другим, с помощью алгоритма, описанного ниже. Для этого необходимо точно вычислять значение N , чтобы можно было совмещать обороты без сдвигов по фазе.

В спектре гармоник на выходе БПФ находят гармонику с максимальной амплитудой, исключая нулевую. Частота этой гармоники соответствует несущей частоте f_2 .

Частота f_1 может быть получена следующим образом:

$$f_1 = \frac{f_2}{k} = \frac{f_d \cdot n_g}{k \cdot n_{fur}}, \quad (1)$$

где n_g – номер гармоники с максимальной амплитудой, f_d – частота дискретизации, $n_{fur}=2^{15}$ – число точек БПФ.

Далее находят число отсчетов N с учетом (1):

$$N = \frac{f_d}{f_1} = \frac{f_d}{\frac{f_d \cdot n_g}{k \cdot n_{fur}}} = \frac{k \cdot n_{fur}}{n_g}. \quad (2)$$

Затем несколько последовательных периодов $T_{1n}, T_{1n+1} \dots$ сопоставляются друг с другом. Для устранения помех применяется следующий алгоритм.

При возникновении помехи модуль производной амплитуды сигнала с помехой $\left| \frac{dU}{dt} \right|$ значительно больше того же модуля производной сигнала без помехи. Критерием выявления помехи служит результат сравнения со значением максимально допустимого модуля производной сигнала $\max \left| \frac{dU}{dt} \right|_d$ за два периода T_1 . При сравнении соответствующих отсчетов нескольких периодов T_1 выбираются отсчеты с минимальной амплитудой, для которых значение $\left| \frac{dU}{dt} \right| \leq \max \left| \frac{dU}{dt} \right|_d$. Значение максимально допустимого модуля производной находят с помощью нейронной сети, осуществляющей кластерный анализ сигнала, что для наглядности может быть показано на самоорганизующихся картах Кохонена.

Кластерный анализ ведется по следующим параметрам (см. табл.).

Таблица

Параметры кластерного анализа

Параметр	Описание	Единицы измерения
Tmax	максимальное значение сигнала по лопатке	код
Tmin	минимальное значение сигнала по лопатке	код
Tmed	средняя значение сигнала по лопатке	код
T'max	максимальный модуль производной по лопатке	код

Из массива исходных данных извлекаются объекты для кластерного анализа – «лопатки», т.е. исходные данные разбиваются на обороты, выделяют два оборота, и каждый оборот разделяется на участки по числу лопаток турбины. Для каждой «лопатки» находят параметры, описанные в таблице. Получаем исходные данные (рис. 8), составляющие обучающую выборку, которые могут быть подвергнуты анализу с помощью карт Кохонена, например, в программном пакете *Deductor, Somap Analyzer*.

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

	A	B	C	D
1	Tmax	Tmin	Tmed	Tmax
2	2469	1975	2173	45
3	2389	1881	2095	58
4	2222	1937	2042	51
5	2154	1748	1941	49
6	2253	1683	1924	57
7	2326	1954	2126	47
8	2269	1835	2016	58
9	2292	1871	2069	55
10	2265	1910	2065	49
11	2323	1841	2025	46
12	2302	1873	2037	50
13	2248	1929	2072	42
14	2236	1738	1939	52
15	2248	1725	1927	53
16	2238	1915	2021	46
17	2135	1847	1960	32
18	2128	1782	1934	39
19	2209	1824	1959	47

Рис. 8. Данные обучающей выборки, представленные в таблице, строки соответствуют кластеризуемым объектам

По обучающей выборке строятся карты, с количеством кластеров, равным 2. Карты, построенные по обучающей выборке, показаны на рис. 9.

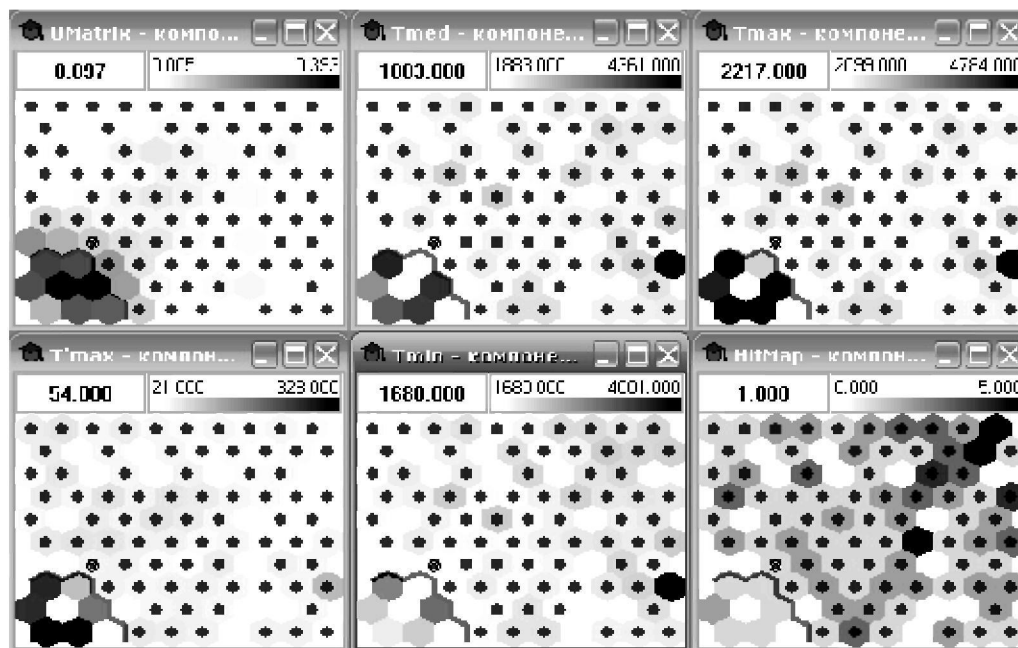


Рис. 9. Самоорганизующиеся карты Кохонена, построенные по параметрам кластеризации унифицированной матрицы и числу попаданий

На рис. 9 представлены 6 самоорганизующихся карт Кохонена, на которых объекты обучающей выборки разбиты на 2 кластера, граница между кластерами обозначена толстой черной линией в левом нижнем углу каждой карты. Первый кластер на всех картах содержит большую часть объектов, второй кластер – меньшую.

Кластеры резко отличаются по величине параметров. Первый кластер – ячейки со светлым фоном (помеченные кружками), в него попали «лопатки», сигнал от которых не был искажен помехами. Второй кластер – ячейки с темным фоном, сюда попали объекты, которые соответствуют участкам сигнала, искаженным помехами. На границе между кластерами в кластере 1 выбирается объект с минимальным значением T_{\max} , равным 54. Это значение соответствует $\max \left| \frac{dU}{dt} \right|_a$.

Таким образом, получают N отсчетов обработанного сигнала, соответствующих периоду T_{1n} . Затем процедура повторяется для получения следующих N отсчетов периода T_{1n+1} . Результат обработки по описанному алгоритму представлен на рис. 10.

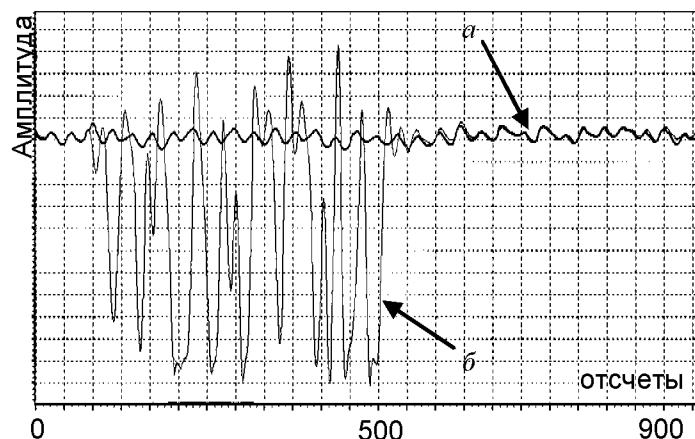


Рис. 10. Результат обработки сигнала: а) обработанный полезный сигнал, б) сигнал с помехой

Таким образом, обработка сигнала, позволяющая бороться с описанными типами помех, производится в несколько этапов:

- вычисление БПФ – число точек M быстрого преобразования Фурье определяет размер массива отсчетов, используемых для дальнейшей обработки;
- вычисление границ высокочастотной помехи в спектре БПФ;
- вычисление частоты следования лопаток ротора ГТД и, соответственно, числа отсчетов N , которое приходится на один оборот турбины;
- применение высокочастотного цифрового фильтра Баттерворта 8 порядка;
- выделение в массиве отсчетов k отдельных оборотов, где k равно целой части от M/N ;
- построение обучающей выборки для кластерного анализа, для этого два последовательных оборота разделяются на объекты – «лопатки», для каждого объекта вычисляются параметры, по которым будет идти кластеризация;
- кластерный анализ полученной обучающей выборки с целью получения значения максимально допустимого модуля производной;
- применение метода замены отсчетов по нескольким (двум или трем) оборотам с учетом максимально допустимого модуля производной $\max \left| \frac{dU}{dt} \right|_a$, полученного с помощью кластерного анализа сигнала.

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Разработанные алгоритмы обработки сигнала оптического пирометрического преобразователя позволяют повысить точность контроля температурного состояния лопаток турбины в реальном времени и, как следствие, повысить эффективность и безопасность функционирования газотурбинной установки в целом.

Библиографический список

1. *Гвоздев В. Е.* Контроль температурного состояния лопаток ротора ГТД на основе прогнозных оценок / В. Е. Гвоздев, Р. А. Мунасыпов, Р. Р. Галеев, А. С. Чепайкин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 9. – С. 21–25.
2. *Чепайкин А. С.* Создание аппаратно-программного комплекса для измерения температуры лопаток ротора ГТД / А. С. Чепайкин, В. Ю. Чернышев // Актуальные проблемы науки и техники : сб. тр. IV Всерос. зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. – Уфа, 2009. – С. 554–558.