

М.А. Алексеев, канд. техн. наук

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Введение. Значительное сокращение затрат на эксплуатацию энергетических объектов дает обслуживание и ремонт по их фактическому состоянию. Опыт длительной эксплуатации, многочисленные теоретические и экспериментальные исследования говорят о том, что для основного оборудования ТЭС (паровых турбоагрегатов) необходим постоянный контроль вибрационных параметров энергетических объектов [1]. Вибрационные сигналы обуславливают быструю реакцию на изменение состояния объекта и являются информативными. На рис. 1. представлена типичная схема расположения вибродатчиков на турбоагрегате. Существующие методы контроля параметров энергетических объектов, основанные на обработке случайных процессов, сопровождающих функционирование объектов управления, не всегда позволяют получить информативные признаки, которые обеспечивают достоверный контроль вибропараметров, и достаточно простую аппаратную и программную реализацию.

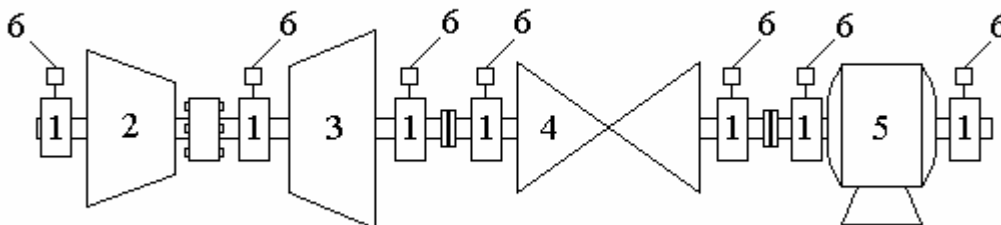


Рис. 1. Схема расположения вибродатчиков на турбоагрегате:

1 – опоры подшипников; 2 – цилиндр высокого давления; 3 – цилиндр среднего давления; 4 – цилиндр низкого давления; 5 – генератор; 6 – вибродатчик

Анализ существующих достижений и публикаций

Вибрационные процессы относятся к классу периодически коррелированных случайных процессов, и в установившихся режимах работы объектов управления вибрацию можно рассматривать как эргодический случайный процесс. Для анализа вибрационных процессов широко используются спектральные методы [1]. При этом получили наибольшее распространение методы формирования спектральных характеристик в базисе Фурье. Важнейшим свойством спектра Фурье является возможность оценки глобальных свойств сигналов, его инвариантность к временному сдвигу.

При исследовании нестационарных сигналов необходимо использовать некоторые локализованные во времени компактные волны, коэффициенты разложения по которым сохраняют информацию о локальных изменениях анали-

зируемого сигнала. Этим требованиям удовлетворяет вейвлет-преобразования, которые отличаются высокой степенью локализованности базисных функций как во временной, так и в частотной областях, что позволяет применять их для обработки различных классов процессов, в том числе и нестационарных [2]. Однако построение новых систем базисных вейвлет-функций представляет собой достаточно сложную задачу. При решении задач оперативного контроля параметров объектов управления реализация вейвлет-преобразования сдерживается значительным объемом вычислений и, как следствие, низкой скоростью обработки данных. Частично эта проблема решается разработанными методами быстрых преобразований. Однако эти методы не всегда пригодны для анализа произвольных сигналов, что способствует поиску новых подходов для снижения вычислительных затрат.

В работе [3] предложен метод формирования субоптимальных по Карунену-Лоэву перестраиваемых спектральных операторов для контроля параметров объектов управления.

Формулировка цели и задачи исследований.

Целью работы является экспериментальное исследование математического аппарата, позволяющего синтезировать ортогональные системы базисных функций, в том числе вейвлетоподобных, субоптимальных по Карунену-Лоэву, учитывающих особенности анализируемых сигналов и обладающих возможностью параметрического перестраивания.

Изложение основного материала исследований.

Операция нахождения дискретного спектра \mathbf{Y} цифровыми методами может быть представлена в виде матричного произведения

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{N} \mathbf{H}_n \mathbf{X},$$

где \mathbf{X} – вектор анализируемой реализации размерности N , $N = p^n$; \mathbf{H}_n – квадратная матрица спектрального оператора размерности $N \times N$.

Число строк матрицы спектрального оператора \mathbf{H}_n равно количеству базисных функций, участвующих в разложении, а элементы строки представляют собой дискретные значения одной из базисных функций в моменты дискретизации.

В работе [4] изложен подход к формированию приспособленных матричных спектральных операторов, основанный на их представлении через обобщенное спектральное ядро, что позволяет получить бесчисленное количество базисных систем функций с алгоритмами быстрых преобразований.

Концепция ядерного представления спектральных операторов не только упрощает процедуру их синтеза, но и позволяет обоснованно выбирать по комплексу критериев спектральный базис.

Следует отметить, что в отличие от известных алгоритмов быстрых преобразований в традиционных базисах, позволяющих вычислять спектральные коэффициенты только в одном базисе, алгоритм быстрого преобразования в

приспособленных базисах является унифицированным, так как зависит от расположения ядер, определяемых углами.

Выражения для углов-параметров при $N=8$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{31} &= \frac{x_2}{x_1}; \operatorname{tg} \varphi_{32} = \frac{x_4}{x_3}; \operatorname{tg} \varphi_{33} = \frac{x_6}{x_5}; \operatorname{tg} \varphi_{34} = \frac{x_8}{x_7}; \\ \operatorname{tg} \varphi_{21} &= \left(\frac{x_3^2 + x_6^2}{x_1^2 + x_2^2} \right)^{1/2}; \operatorname{tg} \varphi_{22} = \left(\frac{x_7^2 + x_8^2}{x_5^2 + x_6^2} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

где x_i – компоненты эталона $\mathbf{X}_{\text{эт}}$.

В общем случае при $N = 2^n$ справедливы следующие соотношения для углов-параметров, образующих ядра спектрального оператора [4]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{nk} &= \frac{x_{2k}}{x_{2k-1}}; \operatorname{tg} \varphi_{(n-k)k} = \sqrt{\frac{x_{4k-1}^2 + x_{4k}^2}{x_{4k-3} + x_{4k-2}}}; \\ \operatorname{tg} \varphi_{1k} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=N/2+1}^N x_i^2}{\sum_{i=1}^{N/2} x_i^2}}. \end{aligned}$$

У некоторых ядер параметры не зависят от исходного эталона (это ядра с углами $\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}, \varphi_{23}, \varphi_{24}$). Эти ядра определяют оставшиеся $N(n/2-1)+1$ степеней свободы и позволяют выполнить дальнейшую оптимизацию базиса под конкретные требования задачи сжатия: уменьшение памяти вычислительных средств, сокращение времени вычисления, упрощение вида базисных функций, приспособление к известному закону распределения обрабатываемых сигналов. Например, если отклонения от эталона имеют равновероятный характер, то нет необходимости использовать оставшиеся степени свободы в ядрах спектрального оператора. Это означает, что достаточно обеспечить выполнение условий, накладываемых на углы спектрального оператора:

$j_{12} = j_{13} = j_{14} = j_{11}, j_{22} = j_{21} j_{24} = j_{23}$. При этом формируется базис, функции которого определены на всем интервале (базис первого типа, рис. 2, а).

При использовании такой закономерности расстановки углов-параметров в случае необходимости уточнения разложения при увеличении размерности в два раза исходного вектора ранее определенные значения углов-параметров остаются без изменения, и расчет новых углов выполняется только для добавляемых матриц.

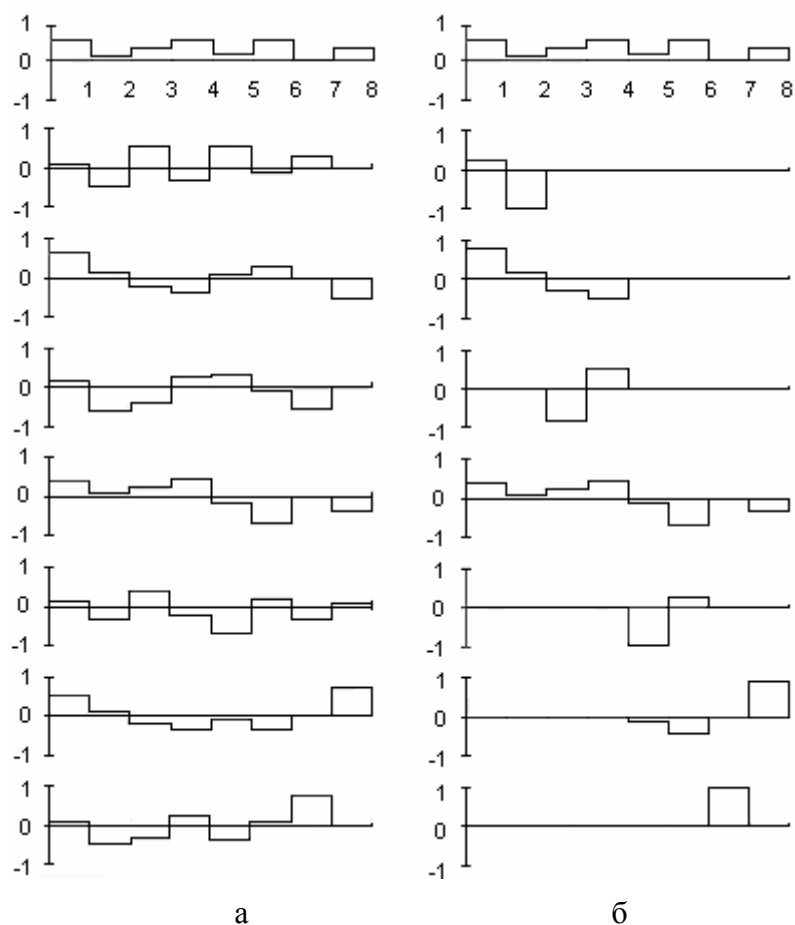


Рис. 2. Функции перестраиваемых спектральных операторов первого (а) и второго (б) типов

Рассмотрим другой случай, когда отклонение от эталона имеет сосредоточенный во времени характер. В этом случае целесообразно построить такой базис, функции которого отличаются локальным поведением на интервале определения и равны нулю на большей его части (подобно базису Хаара). Свойство наилучшего равномерного приближения, которым обладает базис Хаара, можно придать также базису, построенному по методике приспособления к эталону. Для этого необходимо положить оставшиеся углы-параметры равными нулю, т.е. добавить только одну степень свободы (перестраиваемый спектральный оператор второго типа – вейвлетоподобный, (рис. 2, б): $j_{22} = j_{24} = 0$, $j_{12} = j_{13} = j_{14} = 0$. Функции этого базиса позволяют анализировать локальные изменения сигнала. Следует отметить, что разложение сигнала, на основе которого строились базисы как первого типа, так и второго типа, имеет один ненулевой коэффициент разложения. В качестве такого сигнала выбирается, как правило, эталонный представитель класса сигналов. Естественно предположить, что показатель сжатия реализаций класса сигналов при разложении в параметрически перестраиваемых базисах будет в несколько раз больше, чем при разложении в базисах Фурье, Уолша, Хаара. Наличие алгоритма быстрого преобразования у параметрически перестраиваемых базисов позволяет применять их при оперативном контроле параметров объектов управления.

В статье представлены результаты обработки вибрационных сигналов, полученных в лаборатории управления вычислительных работ акционерного общества "Ленинградский металлический завод" (г.С.-Петербург).

Исходные данные представляют 18 объектов. При контроле вибрационных параметров турбоагрегатов в качестве объектов для сжатия рассматривались вибрационные сигналы турбинных и генераторных подшипников турбоагрегатов К-300-240. Для измерения параметров вибраций, действующих на подшипники, использовались в качестве вибродатчиков пьезоакселерометры 4370, усилитель 2635, измерительный магнитофон 7003 и анализатор 3348 (фирма "Брюль и Кьер", Дания).

Рассматривалась задача классификации сигналов для двух состояний объекта (нормального и с механическим дефектом). Каждый класс состояния объекта был представлен 100...150 реализациями, которые подвергались дискретизации с интервалом 0,005 сек, что определяло максимальную частоту спектра Фурье 100 Гц, и представлялись временными рядами длиной $N=64$. Для каждой реализации определялся спектр в традиционных базисах. Эталонный спектр для каждого из сопоставляемых базисов Фурье, Уолша и Хаара определялся как среднее по множеству 25 соответствующих спектров обучающей выборки.

При формировании признаков по предложенному методу для каждого состояния объекта управления были синтезированы перестраиваемые базисы, субоптимальные по Карунену-Лоэву. В качестве исходного эталона при синтезе каждого из базисов использовался соответствующий эталонный спектр модифицированного преобразования Уолша.

Эффективность разных ортогональных преобразований сравнивалась на основании успешности выбора эталона при классификации вибрационных сигналов, используемых при формировании эталона, и вибрационных сигналов, не принадлежащих обучаемому множеству. Критерием при выборе признаков являлось сохранение коэффициентов разложения с наибольшими дисперсиями.

На рис.3 представлены экспериментальные кривые правильного выбора эталона для контрольной выборки в зависимости от числа сохраняемых признаков в традиционных базисах Фурье, Уолша, Хаара. Правильный выбор эталона при этом не превышает 79%.

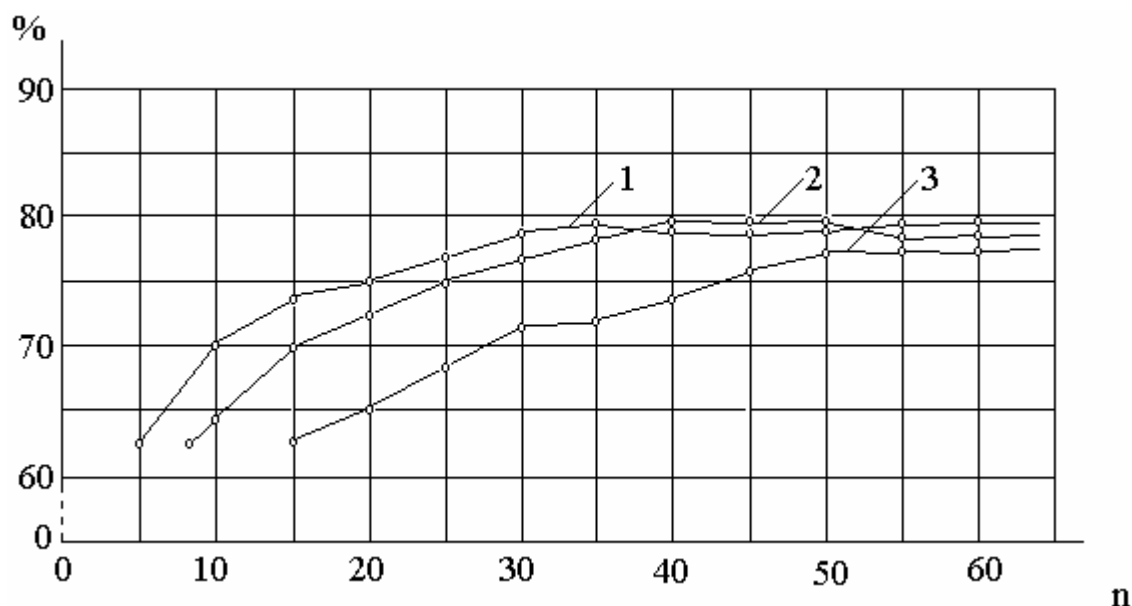


Рис. 3. Результат правильного выбора эталона для контрольной выборки:
 1 – дискретное преобразование Фурье; 2 – дискретное преобразование Уолша;
 3 – дискретное преобразование Хаара.

Для оценки эффективности предложенного метода контроля параметров объекта управления на рис.4 приведена экспериментальная зависимость правильного выбора эталона из кодовой книги от числа используемых признаков (коэффициентов разложения в перестраиваемых базисах) по критерию минимума распределения энергии спектральных составляющих в перестраиваемых базисах в области высоких обобщенных частот.

Очевидно, что пространство признаков, соответствующее перестраиваемым базисам, обладает преимуществом по сравнению с пространствами признаков, соответствующими традиционным преобразованиям, использование которых при выборе эталона дает близкие между собой результаты.

Из рис. 4 видно, что существует оптимальное число признаков, при котором процент правильно выбранных эталонов является наибольшим ($n=15$). Процент правильно выбранных эталонов вибрационных сигналов по предложенному критерию выше (96%), чем при выборе эталона по спектрам в традиционных базисах с использованием критерия по минимуму евклидова расстояния. Процент правильно выбранных эталонов по критерию минимума энтропии коэффициентов разложения в перестраиваемых базисах составил не менее 98%,

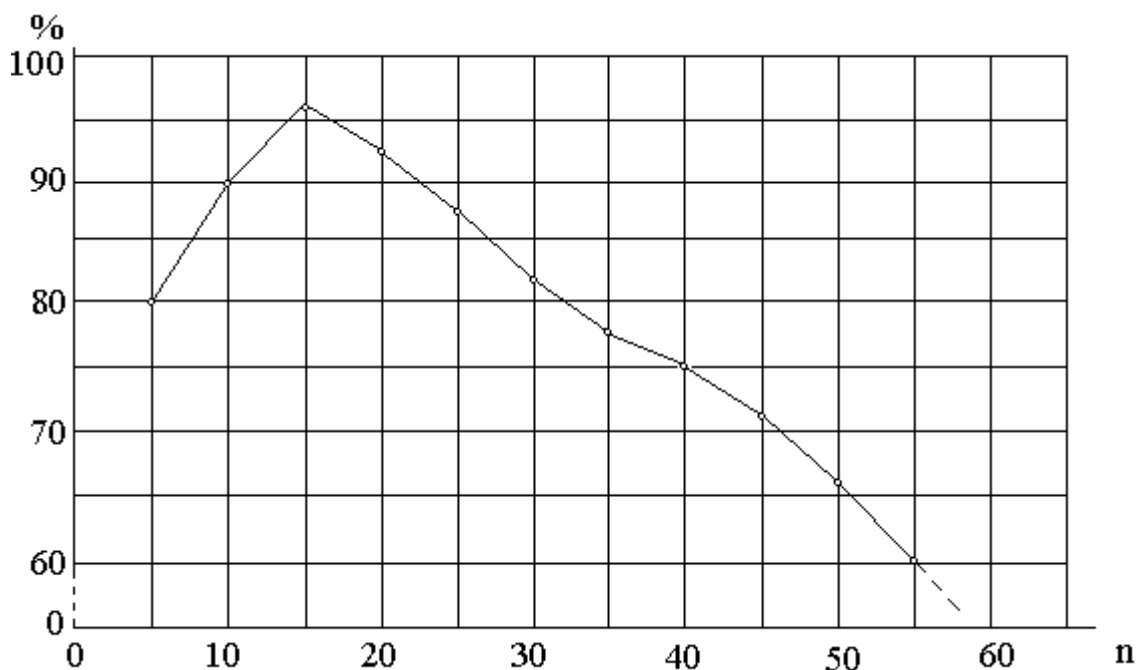


Рис. 4. Результат правильного выбора эталона из кодовой книги по минимуму распределения энергии спектральных составляющих в перестраиваемых базисах в области высоких обобщенных частот

т.е. использование всей информации, заключающейся в коэффициентах разложения спектров модифицированного преобразования Уолша в перестраиваемых базисах, несколько (в среднем на 2%) улучшает выбор эталона из кодовой книги.

Выводы

1. Предложенный подход контроля вибрационных параметров энергообъектов с использованием перестраиваемых субоптимальных по Карунену-Лоэву базисов позволяет более достоверно контролировать параметры объекта управления.

2. При анализе сигналов перестраиваемые базисы 1 типа учитывают глобальные свойства сигналов (изменения сигналов на всем интервале определения), а перестраиваемые базисы 2 типа (вейвлетоподобные базисы) учитывают локальные изменения сигнала подобно базису Хаара (вейвлетам Хаара). Это позволяет в рамках единого подхода совместить преимущества спектрального анализа и вейвлет-анализа сигналов при оперативном контроле параметров объектов управления.

3. Исследования целесообразно продолжить в направлении разработки методов контроля параметров на основе применения параметрически перестраиваемых дискретных ортогональных вейвлет-функций.

Список литературы

1. Повышение эффективности эксплуатации паротурбинных установок ТЭС и АЭС. Т.2. Диагностика паровых турбин / Л.А. Хоменок, А.Н. Ремезов, И.А. Ковалев и др.; под ред. Л.А. Хоменок. – С.Пб.: Изд-во ПЭИпк, 2002. – 310 с.

2. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / С.Малла: [пер. с англ]. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
3. Алексеев М.А. Диагностика сложных объектов на основе использования параметрически управляемых адаптивных спектральных операторов / М.А.Алексеев // Питання прикладної математики і математичного моделювання: Зб.наук. пр. НГУ. – Д., 2008. – С.3–7.
4. Солодовников А.И. Основы теории и методы спектральной обработки информации: учебное пособие / А.И.Солодовников, А.М.Спиваковский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. – 272 с.