УДК 519.876.2:629.735.03(045)

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С.В. ЕНЧЕВ, С.С. ТОВКАЧ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Паниным В.В.

Статья посвящена вопросам вейвлет-анализа сигналов, полученных с датчиков электронных систем управления авиационных газотурбинных двигателей, что позволит заметно улучшить диагностику режимов работы двигателя для предотвращения их выхода из строя и в конечном счете для снижения экономических затрат. Представлена блок-схема автоматического управления авиационным газотурбинным двигателем.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, вейвлет-анализ, электронная система управления.

Введение

Постоянно растущие требования к техническим характеристикам летательных аппаратов (ЛА) привели к существенному усложнению конструктивных схем современных авиационных двигателей и к значительному увеличению значений термодинамических параметров рабочего процесса, прежде всего таких как степень повышения давления воздуха в компрессоре, температуры газов перед турбиной и степени двухконтурности. В этих условиях значительно ужесточаются требования к точности регулирования параметров газотурбинных двигателей (ГТД).

В связи с многообразием факторов, влияющих на рабочий процесс в авиационном двигателе, высокими скоростями изменения этих факторов, а также в связи с необходимостью управления большим числом параметров рабочего процесса авиационные двигатели оборудуются комплексом сложных, взаимодействующих между собой автоматических устройств. Системы управления ГТД, включающие эти устройства, позволяют, с одной стороны, существенно расширить возможности ЛА и, с другой стороны - облегчают управление ими [1].

Полная автоматизация управления современными авиационными ГТД обеспечивает двигателям высокую тяговую эффективность и топливную экономичность, заданные показатели надежности и ресурса. Автоматика современных ГТД характеризуется сложностью реализованных в ней законов управления, наличием нескольких взаимосвязанных контуров регулирования и сложной логикой блокировок и дублирования.

Основная часть

Система автоматического управления (САУ) авиационными ГТД представляет собой сложную взаимосвязанную многоконтурную систему, выбор параметров и анализ характеристик которой являются достаточно сложными задачами [1]. Для решения этих задач целесообразно использовать аналитические методы исследований, позволяющие прежде всего обеспечить устойчивость системы, а также предотвратить появление нестационарных процессов работы двигателя. Известно, что полученные данные из реальных двигателей чаще зашумленные, возникает вопрос обработки данных, выделение полезного сигнала.

Учитывая, что известные методы обработки измерительной информации постоянно наталкивались на принципиальные теоретические ограничения, не позволяющие говорить о принципиальном решении проблемы одинакового представления функции и сигналов методами, созданными на основе средств преобразования Фурье, математиками в 90-х гг. XX в. было введено понятие вейвлетов. Вейвлеты – обобщенное название особых функций, которые имеют вид коротких волновых пакетов с нулевым интегральным значением. Вейвлеты по сути являются новыми математическими понятиями и объектами, применение которых может теоретически

строго приблизить любую функцию и любой сигнал. Поэтому они перспективны в решении математических задач приближения (интерполяция, аппроксимация и т.д.) произвольных нелинейных зависимостей. Вейвлет-преобразования широко применяют для анализа сигналов и сжатия информации. Вейвлеты необходимы во многих исследованиях. Их используют в тех случаях, когда результат анализа некоторого сигнала должен содержать не только простое перечисление его характерных частот (масштабов), но и сведения об определенных локальных координатах, при которых эти частоты себя проявляют. Итак, анализ и обработка нестационарных (во времени) или неоднородных (в пространстве) сигналов различных типов является основным полем применения вейвлет-анализа. Область применения вейвлетов не ограничивается анализом свойств сигналов и полей различной природы, полученных численно, в эксперименте или при наблюдении. Вейвлеты начинают применяться и для прямого численного моделирования как иерархический базис [2], который хорошо приспособлен для описания динамики сложных нелинейных процессов, характеризующихся взаимодействием возмущений в широких диапазонах пространственных и временных частот.

Алгоритм вейвлет-анализа сигналов имеет следующий вид (рис. 1).

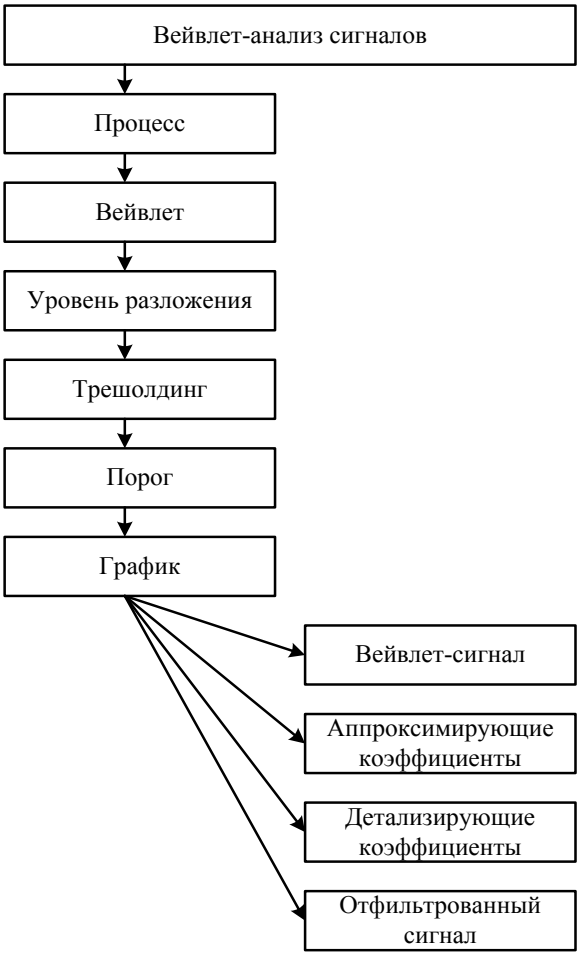

Рис. 1. Структура вейвлет-анализа сигналов

Процесс – генерация случайного процесса или загрузка данных процесса из внешнего файла. В первом случае необходимо указать количество реализаций, количество моментов в реализации, дисперсию процесса, дисперсию ошибок измерения, время, шаг времени.

Вейвлет – выбор вейвлета. Допустимые значения: вейвлет Хаара, вейвлет Добеши 1, вейвлет Добеши 2, вейвлет Добеши 3, вейвлет Добеши 4, вейвлет Добеши 5, вейвлет Добеши 6, вейвлет Добеши 7, вейвлет Добеши 8, вейвлет Добеши 9, вейвлет Добеши 10.

Уровень разложения – уровень вейвлет-разложения сигнала. Допустимы значения от 1 до 10.

Трешолдинг – метод удаления шума. Допустимые значения: мягкий, жесткий.

Порог – определение значения порога при трешолдинге. Допустимые значения: логистический, адаптивный.

График – окно с отображением графика вейвлет-преобразования сигнала. Имеется возможность посмотреть график вейвлет-сигнала на фоне графика реального и зашумленного сигналов, график аппроксимирующих коэффициентов на последнем уровне разложения, график детализирующих коэффициентов на любом уровне разложения.

В простейшей модели предполагается, что зашумленный сигнал имеет вид (1) [3; 4]

$$s(n) = f(n) + \sigma \cdot e(n), \tag{1}$$

где $f(n)$ – полезный сигнал; σ – уровень шума; $e(n)$ – гауссов белый шум, т.е. стационарная случайная последовательность с нулевым математическим ожиданием, абсолютно некоррелированная и с дисперсией, равной единице.

При вейвлет-анализе сигнал раскладывается на аппроксимирующие коэффициенты, которые представляют сглаженный сигнал, и детализирующие коэффициенты, описывающие колебания. Следовательно, шумовая компонента лучше отражается в детализирующих коэффициентах. Подобные составляющие могут быть удалены с использованием процедуры обнуления или пересчета коэффициентов детализации, значения которых меньше по сравнению со значением порога. Процедура пороговой обработки, или "трешолдинг", на сегодняшний день является перспективным инструментом для "очистки" сигнала от шумов (высокочастотных компонент) [3].

Существуют следующие виды трешолдинга [3; 4]:

1) жесткий трешолдинг, при котором все коэффициенты, превышающие некоторый порог, считаются принадлежащими к "оригинальному" сигналу, а остальные относят к шуму и обнуляют (2)

$$f(x) = \begin{cases} x, |x| \geq t; \\ 0, |x| < t, \end{cases} \tag{2}$$

где t – некоторый порог (коэффициент трешолдинга);

2) мягкий трешолдинг (3)

$$f(x) = \begin{cases} x - t, \ x \geq t; \\ 0, |x| < t; \\ x + t, \ x \leq t. \end{cases} \tag{3}$$

Качество шумоподавления сигнала и, следовательно, степень увеличения отношения сигнал/шум зависят не только от вида функции трешолдинга, но также от способа ее применения. В зависимости от этого трешолдинг делится на глобальный и локальный, а локальный в свою очередь на общий и многоуровневый [4].

Для определения пороговых значений будем использовать следующие методы:

1) *SQR-LOG метод* (4) [3]

$$t = \sqrt{2\left(\frac{(median\{c(i)\}, i = 1 \ldots n)}{0{,}6745}\right)^2 \ln(n)}, \tag{4}$$

где 0,6745 – оценка среднеквадратичного отклонения белого Гауссового шума; $c(i)$ – вейвлет-коэффициенты;

2) *метод Берга – Массара* (5) [4]:

$$t = |c(z)|;$$

$$z = \arg\min\left[-\sum\{c^2(i), i < k\} + 2\sigma^2 k\left(a + \ln\left(\frac{n}{k}\right)\right)\right]; \quad (5)$$

$$k = 1\ldots n,$$

где σ^2 – дисперсия шума; a – параметр разреженности $a \geq 1$.

Параметр разреженности является ключевым в методе Берга – Массара, так как именно его величина, задаваемая исследователем, определяет степень подавления имеющихся в сигнале шумов.

В методе Берга – Массара определяются три интервала изменений значения параметра a, которые задают величину "штрафа":

– "высокий" – при $2{,}5 \leq a \leq 10$;

– "средний" – при $1{,}5 \leq a \leq 2{,}5$;

– "низкий" – при $1 \leq a \leq 1{,}5$;

3) *метод Штейна* (6):

$$T_m = \arg\min_{t \geq 0} SURE(W);$$

$$SURE(W) = \sigma^2 - \frac{1}{N}\left(2\sigma^2 \cdot \#\{n : |W(m,n)|\} - \sum_{k=1}^{L} \min(|W(m,n)|)^2\right), \quad (6)$$

где $W(m,n)$ – вейвлет-коэффициенты на уровне разложения m; L – длина вектора вейвлет-коэффициентов $W(m,n)$ на уровне m; σ^2 – дисперсия шума; $\#S$ – мощность множества S.

В качестве меры при выборе базисного вейвлета, применяемого для удаления шумов, будем использовать среднеквадратическую ошибку (7)

$$MSE(w,l) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(s(i) - \theta(i))^2, \quad (7)$$

где $s(i)$ – исходный сигнал; $\theta(i)$ – очищенный сигнал; w – вейвлет-функция; l – уровень разложения сигнала.

Результаты сравнения по видам и методам трешолдинга для вейвлетов "db2" и "db4" на четвертом уровне разложения с использованием локального многоуровневого трешолдинга представлены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Сравнение методов и типов вейвлет-трешолдинга для "db2"

	Жесткий трешолдинг	Мягкий трешолдинг
Метод Берга – Массара	0,0447	0,0563
SQR-LOG метод	2,5625	9,1393
Метод Штейна	1,0046	1,0239

Таблица 2

Сравнение методов и типов вейвлет-трешолдинга для "db4"

	Жесткий трешолдинг	Мягкий трешолдинг
Метод Берга – Массара	0,0393	0,0530
SQR-LOG метод	2,4873	8,9010
Метод Штейна	1,0073	1,0309

Согласно полученным результатам, наилучшим вейвлет-носителем для фильтрации сигнала от шумов является вейвлет "db4" на четвертом уровне разложения, а лучшим методом при локальном многоуровневом вейвлет-трешолдинге является жесткий трешолдинг с использованием метода Берга – Массара и штрафным порогом $a = 6$.

Для примера можно привести модельный сигнал $I(t)$ (рис. 2). Предположим, что необходимо определить продолжительность интервалов T1, T2, T3 с зашумленного сигнала.

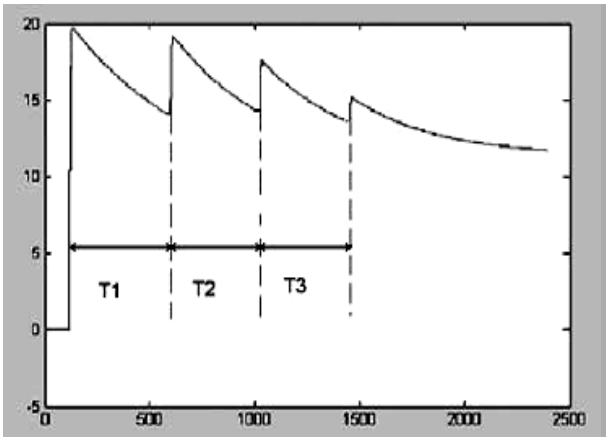

Рис. 2. Модельный сигнал

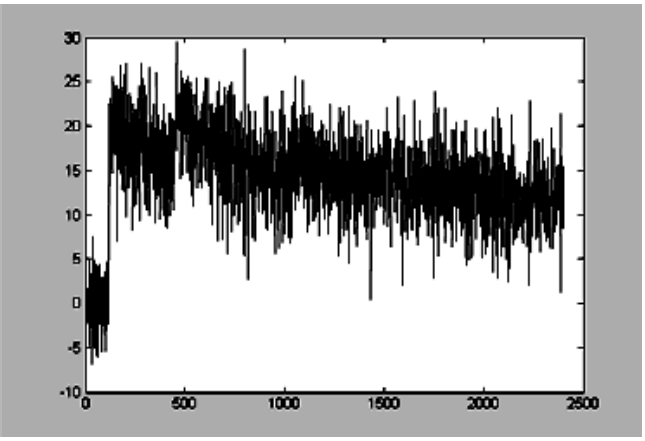

Рис. 3. Зашумленный сигнал

Вейвлет-преобразования используется как инструмент для выделения входного сигнала из смеси сигнал-шум. Все вычисления осуществляются с помощью среды программирования MATLAB 2007b и пакета Simulink [4].

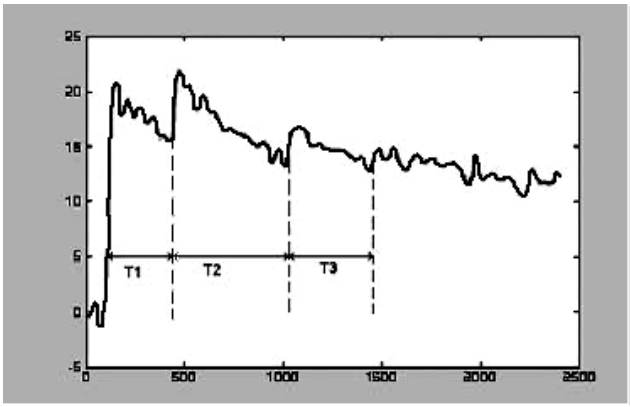

Рис. 4. Отфильтрованный сигнал с помощью мягкого трешолдинга

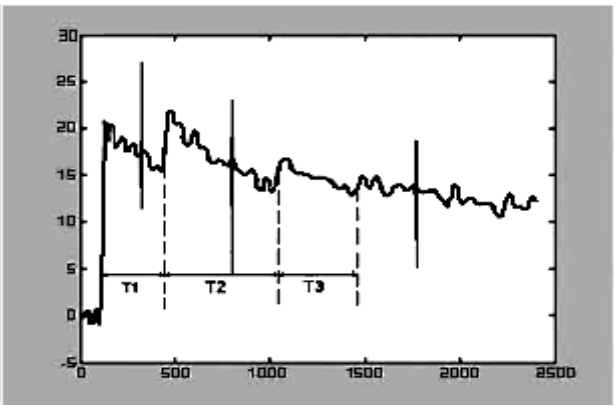

Рис. 5. Отфильтрованный сигнал с помощью жесткого трешолдинга

Выполнено сравнение эффективности двух методов трешолдинга: жесткого и мягкого. Проводилась фильтрация, а тогда исчислялась разница отфильтрованного сигнала и модельного. Даже обычное визуальное сравнение информационных параметров T1, T2, T3 свидетельствует, что при мягком трешолдинге получаем лучший результат, чем при жестком. Основная причина ухудшения определения информационных параметров – появление паразитных всплесков при жестком трешолдинге.

Применение вейвлет-анализа для расширения диапазона управления двигателем путем повышения надежности и скорости срабатывания системы обратной связи как в стационарных условиях, так и в процессе движения при постоянных и неустановившихся режимах работы позволит, за счет раннего выявления предвестников возможного нарушения режима работы, подавать команды о соответствующем регулировании [5].

Сначала проводится диагностика режима работы двигателя, которая заключается в том, что с помощью датчиков, установленных на работающем двигателе, измеряется величина и изменение во времени его физических параметров (вибраций, деформаций, давления газов, акустических шумов и т.п.). В компьютерном блоке превращаются эти сигналы в вейвлет-коэффициенты, анализируются их дисперсии и/или корреляционные матрицы в разных масштабах, происходит фильтрация. После чего на основании их изменений со временем и заложенных алгоритмов компьютер делает выводы о необходимости изменения режима работы двигателя и способе осуществления этой операции, передает соответствующую команду в систему автоматического управления, которая проводит регулирование двигателя через исполнительное устройство. Таким способом достигается саморегулирование двигателя.

Автоматическое управление отличается высокой степенью надежности, обеспечиваемой свойствами диагностики с помощью вейвлет-анализа, быстродействием и точностью компьютерной обработки сигналов с датчиков и подачи команды регулирования. А также многофункциональностью всей системы, когда помимо сигналов датчиков при компьютерной обработке подается и другая информация (например, данные о полете в случае летательных аппаратов). По результатам их совместной обработки по многим параметрам выбираются необходимые команды на выполнение конкретных операций из серии возможных способов регулирования двигателя, заложенных в компьютер. Все эти особенности вместе обеспечивают расширение диапазона управления двигателем.

Для лучшего представления работы САУ ГТД приведена блок-схема (рис. 6).

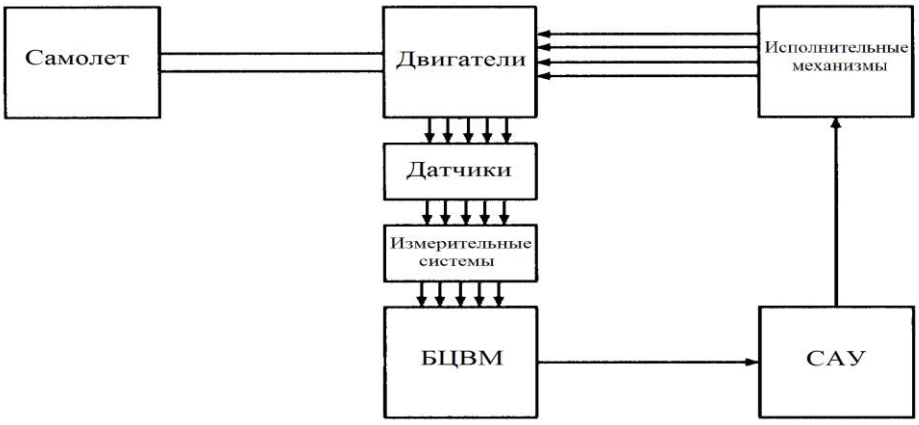

Рис. 6. Блок-схема автоматического управления авиационным ГТД

Блок-схема управления состоит из двигателя, датчика сигналов о его режиме работы, измерительного устройства, компьютера (бортовая цифровая вычислительная машина – БЦВМ), системы автоматического управления и исполнительного устройства.

Управление осуществляется следующим образом. Датчик на двигателе регистрирует физические параметры (вибрацию, деформации, колебания давления, акустические шумы и т.п.) работы двигателя и передает их на измерительное устройство, которое преобразует эти данные в набор чисел, характеризующий изменение величины параметров со временем через определенные интервалы времени, затем этот набор поступает в БЦВМ, которая выполняет вейвлет-анализ путем вычисления соответствующих вейвлет-коэффициентов, их дисперсии и высших корреляционных матриц на разных масштабах, и в случае выявления их заметного изменения по сравнению с нормальным режимом работы двигателя выбирает способ регулирования работы, согласовывает его также с информацией о полете, и выдает команду в систему автоматического управления, которая приводит в действие исполнительное устройство, изменяющее режим работы двигателя согласно полученной команды.

Предложенный способ может быть использован для автоматического управления режимом работы любых регулярно (в частности, периодически) работающих двигателей как при постоянных, так и неустойчивых режимах с целью предотвращения повреждений и аварий.

Вывод

Применение вейвлет-преобразования позволяет детально рассматривать сигнал, исследовать те области сигнала, которые могут содержать информацию о повреждении. Этот метод позволяет диагностировать повреждения на ранних стадиях, когда они не заметны при внешнем осмотре, но вносят вклад в снижение эффективности работы двигателя. Дальнейшее развитие этой области позволит выявлять дефекты и места их дислокации, снижая эксплуатационные расходы и расходы, связанные с простоем оборудования, и позволит наиболее эффективно использовать двигатели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климентовский Ю.А. Системы автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов: учеб. пособие / под ред. М.М. Митраховича. - Киев: КВІЦ, 2001.

2. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов / пер. с англ. - М.: Мир, 2005.

3. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. - М.: ДМК Пресс, 2008.

4. Алексеев К.А. Очерк "Вокруг CWT" [Електронный ресурс]. URL: http://matlab.exponenta.ru/wavelet/book3/index.php.

5. Гуревич О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями: учеб. пособие. - М.: Изд-во МАИ, 2001.

WAVELET ANALYSIS OF PARAMETERS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF THE AIRCRAFT ENGINES

Enchev S.V., Tovkach S.S.

The article deals with wavelet analysis of signals received from the sensors of electronic control systems of aircraft gas turbine engines, which will significantly improve the diagnostics of engine operating condition to prevent failure and ultimately to reduce the economic costs. A block diagram of automatic control of aircraft gas turbine engine is presented.

Key words: gas turbine engine, the wavelet analysis, electronic control system.

Сведения об авторах

Енчев Сергей Васильевич, 1979 г.р., окончил Национальный авиационный университет (2002), кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и энергоменеджмента Аэрокосмического института Национального авиационного университета, автор более 20 научных работ, область научных интересов – методы синтеза и диагностики систем управления энергосистемами летательных аппаратов.

Товкач Сергей Сергеевич, 1989 г.р., окончил Черкасский национальный университет им. Б. Хмельницкого (2011), аспирант Аэрокосмического института Национального авиационного университета, автор 3 научных работ, область научных интересов – автоматизированная обработка измерительной информации в электронных системах управления авиационными ГТД.