

УДК 629.7.03:681.5.03 (045)

В.В. ПАНИН¹, С.В. ЕНЧЕВ², А.В. ПОПОВ², А.Ю. СИДОРЕНКО²¹Киевская государственная академия водного транспорта, Киев, Украина²Национальный авиационный университет, Киев, Украина

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОМПАЖА В КОМПРЕССОРАХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

В статье рассматривается проблема идентификации помпажных явлений в компрессорах авиационных газотурбинных двигателей. Обосновывается применимость метода распознавания помпажа с помощью вейвлет-разложения сигналов датчиков давления двигателя. Определен способ вейвлет-обработки сигналов. Разработан алгоритм вейвлет-преобразования разрабатываемого устройства идентификации помпажных и предпомпажных состояний. Отмечен особый характер поведения дисперсии распределения вейвлет-коэффициентов за 1...2 с до начала помпажа, что может являться информативным признаком его наступления.

Ключевые слова: помпаж, вейвлет-коэффициенты, вейвлет-анализ, компрессор, авиационный газотурбинный двигатель, ортогональное разложение.

Введение

Газодинамическая устойчивость компрессоров авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является одним из важнейших условий, которое определяет их надежность и уровень безопасности полетов. Неустойчивая работа компрессора в системе двигателя, так называемый помпаж, вызывает интенсивные колебания давления рабочего тела в проточной части или газодинамические удары. Помпаж является причиной выключения двигателей в полете, пожара или обгорания лопаток турбины [1, 2].

Анализ причин возникновения помпажа компрессоров авиационных ГТД свидетельствует о том, что в большинстве случаев в процессе развития этого явления происходят события, которые последовательно усложняют ситуацию в полете. За статистическими данными [1] более 70% авиационных событий возникает в результате совокупности нескольких неблагоприятных факторов. Обычно эта совокупность нескольких различных факторов связана с деятельностью экипажа, функциональной эффективностью ГТД и условиями полета.

Анализ исследований и публикаций. Результаты исследований представленных в источниках [1 – 4] показывают, что помпаж в авиационном ГТД приводит к потере тяги, сопровождается ростом температуры газов перед турбиной и повышением уровня вибраций в результате больших амплитуд пульсаций давления и массовых затрат по тракту двигателя. Наличие помпажа является серьезной преградой на пути увеличения надежности ГТД в частности и безопасности полетов в целом [1, 6]. На

сегодняшний день разработаны и широко применяются средства антипомпажной автоматики в которых реализованы следующие методы защиты от помпажных явлений:

- полная отсечка топлива (помпаж фиксируется по совокупности параметров работы двигателя);
- частичные воздействия одновременно на несколько управляющих органов силовых установок самолета;
- чередующиеся воздействия на управляющие органы ГТД;
- уменьшение амплитуды помпажных колебаний и увеличение запасов устойчивости с помощью санкционированных воздействий на проточную часть ГТД (поворот лопаток направляющих аппаратов, изменение величины радиального зазора, изменение сечений сопловых аппаратов первых ступеней турбины и т.д.);
- поддержка определенных законов управления.

Отдельную важную задачу составляют методы идентификации помпажа. В статье [1] предложен метод и устройство распознавания помпажа, а в работе [7] показана применимость использования ортогональных разложений в задачах идентификации помпажных явлений в компрессорах авиационных двигателей.

1. Постановка задачи

Вейвлеты стали необходимым математическим инструментом во многих исследованиях [8]. Их используют в тех случаях, когда результат анализа

сигнала должен содержать не простое перечисление его характерных частот, но и сведения об определенных локальных координатах, при которых эти частоты проявляют себя. Таким образом, обработка нестационарных (во времени) или неоднородных (в пространстве) сигналов разных типов представляют основную сферу применения вейвлет-анализа. Общий принцип построения базиса вейвлет-преобразования состоит в использовании масштабного преобразования и смещений. Любой из наиболее часто применяемых вейвлетов порождает полную ортонормированную систему функций с конечным носителем, построенных с использованием масштабного преобразования и сдвигов [8]. Именно за счет изменения масштабов вейвлеты способны выявить различия в характеристиках на разных шкалах, а путем сдвига проанализировать свойства сигнала в разных точках на всем изучаемом интервале. Так как, эта система вейвлетов является полной, возможно обратное преобразование. При анализе нестационарных сигналов за счет свойства локальности вейвлеты получают существенное преимущество перед преобразованием Фурье, которое дает нам только глобальные сведения о частотах исследуемого сигнала, поскольку используемая при этом система функций определена на бесконечном интервале. Таким образом, задачу исследований сформулируем в виде – исследование применимости метода вейвлет-анализа для задач идентификации предпомпажных и помпажных явлений в компрессорах авиационных ГТД.

2. Способ вейвлет-обработки сигналов

Решающими в выборе способа обработки сигналов для обнаружения предпомпажного состояния компрессора авиационного ГТД, являются следующие требования:

- быстроедействие системы принятия решений и его выполнения, соизмеримое со временем возникновения катастрофических последствий;

- однозначность, или надежность, то есть результат выполнения алгоритма должен дать однозначное решение для следующего шага в работе системы управления и сбой в его работе не должен возникнуть в процессе обработки. Неоднозначность не допустима;

- обеспечение достоверности и необходимой точности определения выходных параметров.

Вейвлет-анализ часто применяется в современной практике обработки сигналов. Существуют базовые функции, на основе которых выполняется разложение, все они имеют свои особенности.

Успешное применение вейвлет-анализа для конкретной задачи состоит в правильном выборе

типа вейвлета (Haar, Daubechies, Biorthogonal, Coiflets, Symlets, Morlet, Mexican Hat, Meyer, Shifting и др.), который хорошо подходит для разложения исследуемого сигнала, а также правильном определении числа уровней, на которые необходимо разложить сигнал для получения на одном из них искомого периодического сигнала. Анализ перечисленных способов показывает, что общее последовательное применение сначала вейвлет-анализа, а затем на основе его периодограммного и корреляционного анализа позволяет получить комбинированный алгоритм, что отвечает основным требованиям для обработки нестационарных сигналов давления с целью выявления предпомпажного состояния компрессора авиационного ГТД.

3. Алгоритм вейвлет-преобразования

Существуют две функции: масштабирующая функция $\phi(x)$ и вейвлет $\psi(x)$, если вейвлеты ортонормированные. Тогда для каждого $j \in \mathbb{Z}$ система функций

$$\phi_{j,n}(x) = \sqrt{2^j} \phi(2^j x - n), \quad n \in \mathbb{Z},$$

является ортонормированным базисом пространства $V \subset L^2(\mathbb{R})$. Система подпространств $V_j, j \in \mathbb{Z}$ создает бесконечную в обе стороны последовательность вложенных подпространств $\dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \dots \subset V_j \subset \dots$, причем такую, чтобы

$$\bigcap_{j=-\infty}^{\infty} V_j = \{0\} \quad \text{и} \quad \overline{\bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j} = L^2 \mathbb{R}.$$

Операторы проектирования дают приближения элементов, все более и более точные с увеличением j

$$P_j(f) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} (f, \phi_{j,n}) \phi_{j,n}(x).$$

Число j характеризует уровень разрешения. Чем больше j , тем более мелкие носители имеют функции $\phi_{j,n}(x)$. Тогда коэффициенты более детально отображают свойства $f(x)$.

Символом sA_0 обозначается набор коэффициентов разложения:

$$sA_0 = \{a_{j,n}\}, \quad a_{j,n} = (f, \phi_{j,n}) = \int_{\mathbb{R}} f(x) \overline{\phi_{j,n}(x)} dx.$$

Коэффициенты $sA_0 = \{a_{j,n}\}$ дают информацию относительно функции $f \in L^2(\mathbb{R})$.

Дальше, чтобы исключить потерю информации $f(x)$ при переходе на низший уровень, каждое под-

пространство V_j разлагается в прямую сумму ортогональных подпространств

$$V_j = V_{j-1} \oplus W_{j-1}.$$

Это разложение позволяет вместо j -го уровня приближения $P_j(f)$ взять сумму

$$P_j(f) = P_{j-1}(f) + P_{j-1}^w(f).$$

Первое слагаемое является более грубым приближением в пространстве V_{j-1} , а второй отображает детали, которыми $P_{j-1}(f)$ отличается от $P_j(f)$, в базисах пространств V_{j-1} и W_{j-1}

$$P_j(f) = \sum_{k \in Z} a_{j-1,k} \varphi_{j-1,k}(x) + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(x),$$

где $a_{j-1,k}$ - коэффициенты аппроксимации $(j-1)$ -го уровня разрешения

$$a_{j-1,k} = (f, \varphi_{j-1,k}) \int f(x) \overline{\varphi_{j-1,k}(x)} dx$$

и $d_{j-1,k}$ - детализирующие коэффициенты

$$d_{j-1,k} = (f, \psi_{j-1,k}) = \int f(x) \overline{\psi_{j-1,k}(x)} dx.$$

Получены наборы коэффициентов обозначены символами cA_1 и cD_1 :

$$cA_1 = \{a_{j-1,k}\}, \quad cD_1 = \{d_{j-1,k}\}.$$

Таким образом, получаются два набора коэффициентов разложения. По построению коэффициенты cA_1 и cD_1 в совокупности дают ту информацию, что и начальный набор коэффициентов cA_0 . Преимущество коэффициентов cA_1 и cD_1 заключается в том, что они несут еще и качественную информацию. А именно, коэффициенты cA_1 описывают более грубое (сглаженное) приближение функции $f(x)$ в пространстве V_{j-1} , а коэффициенты cD_1 характеризуют колебание функции $f(x)$ относительно $P_{j-1}(f)$.

Второе преимущество набора коэффициентов cA_1 и cD_1 заключается в том, что данные, которые представляют сглаженную функцию, можно еще раз разложить на еще более сглаженную часть $P_{j-2}(f)$ и детализированную часть $P_{j-2}^w(f)$.

Здесь:

$$P_j(f) = P_{j-2}(f) + P_{j-2}^w(f) + P_{j-1}^w(f);$$

$$P_j(f) = \sum_{k \in Z} a_{j-2,k} \varphi_{j-2,k}(x) + \sum_{k \in Z} d_{j-2,k} \psi_{j-2,k}(x) + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(x);$$

$cA_2 = \{a_{j-2,k}\}$ - коэффициенты аппроксимации глубины разложения 2;

$cD_2 = \{d_{j-2,k}\}$ - коэффициенты, которые детализируют глубину разложения 2;

$cD_1 = \{d_{j-1,k}\}$ - коэффициенты, которые детализируют глубину разложения 1.

Повтор процедуры N раз приводит к вейвлет-разложению аппроксимации j -го уровня разрешения в виде серии коэффициентов

$$P_j(f) = \{cA_n, cD_n, cD_{n-1}, \dots, cD_1\},$$

где $cA_N = \{a_{j-N,k}\}$ - коэффициенты аппроксимации разложения глубины N ; $cD_N = \{d_{j-N,k}\}$ - детализирующие коэффициенты разложения глубины $m = 1, 2, \dots, N-1, 2, \dots, N$.

Графически данное вейвлет-разложение можно изобразить в виде диаграммы (рис. 1).

На уровне вейвлет-коэффициентов (рис. 2)

$$P_j(f) = cA_0 \rightarrow \{cA_1, cD_1\} \rightarrow \{cA_2, cD_2, cD_1\} \rightarrow \dots \rightarrow \{cA_n, cD_n, cD_{n-1}, \dots, cD_1\}.$$

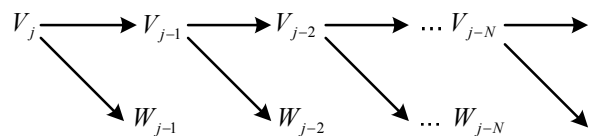


Рис. 1. Вейвлет-разложение пространства

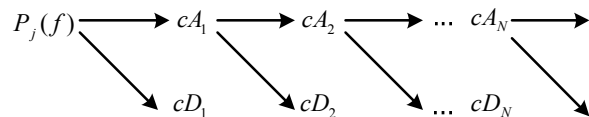


Рис. 2. Вейвлет-разложение сигнала

Вейвлет-превращающей функцией $f(x)$ называется нахождение коэффициентов $\{cA_n, cD_n, cD_{n-1}, \dots, cD_1\}$.

Вейвлет-анализ состоит из следующих шагов:

1. Выбирается достаточно высокий уровень разрешения j , такой, что аппроксимация с нужной точностью отображает функцию $P_j(f)$. Практически здесь проблем не возникает, поскольку функция $f(x)$ обычно задается массивом значений. Эти значения и берутся за начальное приближение $P_j(f)$.

2. Выбирается глубина разложения N и находим коэффициенты вейвлет-разложения:

$$\{cA_n, cD_n, cD_{n-1}, \dots, cD_1\}.$$

Эти коэффициенты анализируются и изменяются в случае необходимости.

3. Функция $f(x)$ восстанавливается с использованием (возможно измененных) коэффициентов разложения:

$$f(x) = \sum_{k \in Z} a_{j-n,k} \varphi_{j-n,k}(x) + \\ + \sum_{k \in Z} d_{j-n,k} \psi_{j-n,k}(x) + \dots + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(x).$$

Остается проблема начальных коэффициентов $sA_0 = \{a_{j,n}\}$. Их непосредственное вычисление в виде интегралов

$$a_{j,n} = \int s(x) \overline{\varphi_{j,n}(x)} dx,$$

во-первых, представляет трудоемкую операцию, а во-вторых, может не обеспечить нужной точности, когда j достаточно большое (мелкий масштаб). Есть несколько способов решения этой проблемы.

Функция задается как массив значений $y_n = f(x_n)$ в точках, которые проходят область изменений параметра с некоторым постоянным шагом h . Тогда самый простой способ решения проблемы – взять в качестве начальных коэффициентов sA_0 массив значений функции $f(x)$, $a_{j,n} = y_n$. Такой подход используется в библиотеках для вейвлетов.

4. Выявления предпомпажного состояния компрессора авиационного ГТД

Для выявления факта появления предпомпажного состояния и создания системы антипомпажной защиты в реальном времени на компрессоре авиационного ГТД, необходимо иметь измерительную информацию о состоянии потока рабочей среды (газа) в его проточной части.

Для получения необходимой информации с целью определения состояния потока в проточной части компрессора достаточно провести анализ периодических составляющих пульсаций давления. При этом необходимо иметь в виду неминуемое существование сверхнизкочастотных колебаний (давления) из-за переходных процессов в топливной системе двигателя и флуктуации частоты вращения, а также хаотических пульсаций турбулентного типа и квазидетерминированных макропульсаций в областях (локальных) отрывов. Это обуславливает сложный, в общем случае, мультипликативный характер сигнала, используемого для исследования состояния центробежного компрессора.

Достаточно полную информацию о нестационарности пульсаций давления и состоянии компрессора можно получить в самом рабочем колесе (РК) или в неподвижных элементах, близких к РК, то есть в безлопаточном пространстве между РК и диффузором, в диффузоре или в поворотном колене. Поэтому для решения задачи выявления предпомпажного состояния рекомендуется получать информацию из датчиков, размещенных на входе в диффузор и на выходе из него.

Экспериментальная установка для исследования помпажных явлений должна представлять собой ступень компрессора, что состоит из входного патрубка, РК, лопаточного и безлопаточного диффузора, поворотного колена и направляющих аппаратов, выходной камеры и выходной трубы.

Многомасштабный вейвлет-анализ изменения давления в компрессоре авиационного ГТД позволяет обнаружить намного раньше проявляющие себя признаки неустойчивости и развития помпажа. Сигналы с восьми датчиков [8], расположенных в разных местах компрессора авиационного ГТД, были записаны, оцифрованы и затем проанализированы при трех режимах работы двигателя (76, 81 и 100% от номинальной скорости вращения) в стационарных условиях с интервалами 1 мс в течение 5...6 с перед началом помпажа. Неустойчивость вызывалась плавной инжекцией добавочного воздуха в компрессор. Выходные сигналы датчиков в интервал времени за 5...6 с перед помпажом были подвергнуты вейвлет-анализу. Так как, сигнал флуктуирует во времени, флуктуируют и вейвлет-коэффициенты. Естественной мерой этих флуктуаций служат дисперсии распределений на разных масштабах. На масштабе $j=5$ было обнаружено заметное резкое падение дисперсии распределения вейвлет-коэффициентов, происходящее за 1...2 с до того, как проявятся нарушения в работе двигателя. Дисперсия распределения вейвлет-коэффициентов вычисляется по формуле:

$$\sigma(j, M) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=0}^{M-1} [d_{j,k} - \overline{d_{j,k}}]^2},$$

где M означает число вейвлет-коэффициентов на уровне j в заданном временном интервале.

Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность применения метода идентификации основанного вейвлет-анализе сигналов с датчиков давления газа в компрессоре авиационного ГТД. Разработан алгоритм вейвлет-преобразования устройства протипомпажной защиты. Формирование информационного признака о предпомпажном состоянии производится на основании характера поведения дисперсии распределения вейвлет-коэффициентов – резкое падение, происходящее за 1...2 с до того, как проявятся нарушения в работе двигателя.

Литература

1. Волянська Л.Г. Методи і засоби підвищення газодинамічної стійкості компресорів газотурбінних двигунів : монографія / Л.Г. Волянська, В.В. Панин, Сунь Гаюнь. – К.: НАУ, 2005. – 200 с.

2. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах / В.В. Казакевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.

3. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов / В.И. Васильев, Ю.М. Гусев, А.И. Иванов и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

4. Письменный И.Л. Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе / И.Л. Письменный. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.

5. Панин В.В. Метод и устройство распознавания предпомпажных явлений в компрессорах авиационных ГТД / В.В. Панин, И.Ф. Кинашук, В.И. Орланов // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. – 2001. – № 4. – С. 63-69.

6. Панін В.В. Аналіз методів побудови систем протипомпажного захисту авіаційних газотурбінних двигунів / В.В. Панін, С.В. Єнчев // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту. ISDMCI'2010: міжнар. наук.-техн. конф.: тези доп.; М-во освіти і науки України, Херсонський нац. техн. ун-т. – Херсон, 2010. – Т. 2. – С. 502-505.

7. Панин В.В. Использование ортогональных разложений в задачах идентификации помпажных явлений в компрессорах авиационных газотурбинных двигателей / В.В. Панин, С.В. Енчев, Л.Г. Волянская // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 8 (75). – С. 112-116.

8. Дремін І.М. Вейвлет-аналіз і його використання / І.М. Дремін, О.В. Іванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 5, № 171. – С. 465-501.

Поступила в редакцию 1.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.М. Митрахович, ЗМКБ "Прогресс", Запорожье, Украина.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПОМПАЖА В КОМПРЕСОРАХ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

В.В. Панін, С.В. Єнчев, О.В. Попов, О.Ю. Сидоренко

У статті розглядається проблема ідентифікації помпажних явищ в компресорах авіаційних газотурбінних двигунів. Обґрунтовується можливість застосування методу розпізнавання помпажа за допомогою вейвлет-розкладання сигналів датчиків тиску двигуна. Визначено спосіб вейвлет-обробки сигналів. Розроблено алгоритм вейвлет-перетворення розроблюваного пристрою ідентифікації помпажних і передпомпажних станів. Відмічено особливий характер поведінки дисперсії розподілу вейвлет-коефіцієнтів за 1...2 с до початку помпажа, що може бути інформативною ознакою його настання.

Ключові слова: помпаж, вейвлет-коефіцієнти, вейвлет-аналіз, компресор, авіаційний газотурбінний двигун, ортогональне розкладання.

IDENTIFICATION OF SURGE IN COMPRESSORS OF AVIATION TURBO-ENGINES BY VEYVLET-ANALYSIS

V.V. Panin, S.V. Enchev, A.V. Popov, A.Yu. Sidorenko

The article sets out the problem of the surge phenomena identification in the compressors aviation turbo-engines. Applicability of method recognition surge is grounded by veyvlet-decomposition of signals pressductors engine. The method of veyvlet-treatment of signals is definite. The algorithm of the wavelet transform of the developed device identification surge and prisurge states. It is marked special pattern of behaviour dispersion of distributing veyvlet-coefficients after 1...2 s to beginning of surge, that can be the informing sign of his offensive.

Key words: surge, veyvlet-coefficients, veyvlet-analysis, aviation turbo-engine, ortogonal decomposition.

Панин Владислав Вадимович – д-р техн. наук, проф., ректор Киевской государственной академии водного транспорта, Киев, Украина.

Єнчев Сергей Васильевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и энергоменеджмента Аэрокосмического института Национального авиационного университета, Киев, Украина, e-mail: esw@ukr.net.

Попов Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры сохранения летной годности воздушных судов и авиадвигателей Аэрокосмического института Национального авиационного университета, Киев, Украина.

Сидоренко Александр Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий аэропортов Аэрокосмического института Национального авиационного университета, Киев, Украина.