

УДК 629.7.03:681.5.03 (045)

В.В. ПАНИН, С.В. ЕНЧЕВ, Л.Г. ВОЛЯНСКАЯ

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОМПАЖНЫХ ЯВЛЕНИЙ В КОМПРЕССОРАХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*В статье рассматривается проблема идентификации помпажных явлений в компрессорах авиационных газотурбинных двигателей. Обосновывается применимость метода распознавания помпажа с помощью разложения импульсной переходной функции двигателя в ряд ортонормированных функций Уолша. В качестве диагностического признака помпажа приняты коэффициенты разложения Уолша–Фурье. Разработаны алгоритм и функциональная схема устройства идентификации помпажа. Такой подход позволяет устранить возможность ложного срабатывания сигнализаторов помпажа вследствие резкой смены режима работы двигателя и уменьшить размерность пространства диагностических признаков.*

**Ключевые слова:** помпаж, авиационный газотурбинный двигатель, устройство идентификации, функции Уолша; ортогональное разложение.

### Введение

Современные авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) – это сложные тепловые машины специального назначения, которые состоят из большого количества связанных систем и устройств, к которым выдвигаются требования получения экстремальных значений параметров в заданных условиях эксплуатации (минимальная удельная затрата топлива в номинальном режиме, максимальная тяга при взлете и т.д.), а также потребность обеспечения других эксплуатационных характеристик ГТД [6].

Эти факторы приводят к постоянному осложнению конструкций современных ГТД, появления новых систем и устройств – регулируемых направляющих аппаратов, клапанов перепуска воздуха из компрессора, регулируемых систем охлаждения турбины и т.д. Такие осложнения конструкции вызывают возможность возникновения колебаний отдельных параметров, а также возможность влияния колебаний в одних системах на работу других систем и появление многочастотных колебаний в ГТД. Характерной особенностью всех этих режимов является наличие периодических составляющих.

**Анализ исследований и публикаций.** Как показывают результаты исследований представленных в [1 – 4], помпажные явления в ГТД приводят к потере тяги, сопровождаются ростом температуры газов перед турбиной и повышением уровня вибраций в результате больших амплитуд пульсаций давления и массовых затрат по тракту двигателя. Возможность появления этих явлений является серьез-

ной преградой на пути увеличения надежности ГТД в частности и безопасности полетов в целом [4].

Кратковременная потеря тяги в случае появления помпажа на одном из двигателей для многомоторного самолета или даже для одномоторного в случае достаточного для повторного запуска запасов высоты и скорости не приводит к катастрофической ситуации [1]. Однако рост температуры в турбине и увеличение уровня вибраций может привести к прогару турбины и разным поломкам [2]. Опыт эксплуатации [2 – 4] показывает, что особенно опасным для двигателя является недопустимый рост температуры газов перед турбиной.

**Постановка задачи.** Для увеличения запасов устойчивости ГТД используют [4, 6]: регулирование направляющих аппаратов компрессора, перепуск воздуха из отдельных ступеней компрессора, регулируемое дозирование подачи топлива на режимах запуска, приемистости дросселирования и т.д. Эти мероприятия уменьшают вероятность возникновения помпажных явлений, но не могут служить гарантией их устранения, так как помпаж может быть следствием отказов в самих системах, предназначенных для предупреждения срывов. Кроме этого, увеличение запасов устойчивости приводит к значительному снижению КПД компрессора и, соответственно, экономичности ГТД [4].

Поэтому целесообразно допустить небольшую вероятность возникновения помпажа, но оборудовать ГТД аварийными системами антипомпажной защиты и обеспечить максимальную экономичность двигателей [6].

Эффективность применения таких систем существенно зависит от метода идентификации заложенного в ее принцип действия. В этой связи особый интерес представляет метод идентификации, использующий ортогональное разложение импульсных переходных функций в ряд по функциям Уолша [1, 5]. В этом случае устраняется возможность ложного срабатывания сигнализаторов помпажа вследствие резких изменений режима работы ГТД, а также снизить размерность пространства диагностических признаков в сравнении с диагностированием на основе отсчетов исследуемого процесса [1].

### Свойства ортогональных функций Уолша

Рассмотрим основные свойства ортогональных функций Уолша, которые будем использовать при изложении разрабатываемых методов идентификации. Функции Уолша относятся к классу кусочно-постоянных ортогональных функций [5], который составил основу для создания и развития секветного анализа, т.е. исследования процессов с помощью несинусоидальных функций. Наиболее наглядно система функций Уолша выводится из системы функций Радемахера. Функция Радемахера с индексом  $m$ , обозначаемая  $r_m(t)$ , имеет вид последовательности прямоугольных импульсов и содержит  $2^{m-1}$  периодов на интервале  $[0,1]$ , принимая значения  $+1$  или  $-1$  (рис. 1). Исключение составляет функция  $r_0(t)$ , которая имеет вид единичного импульса.

Система функций Уолша является полной системой ортонормированных функций, т.е. любая абсолютно интегрируемая на интервале  $[0,1]$  функция может быть с заданной точностью представлена в виде взвешенной суммы конечного числа функций Уолша. Между функциями Уолша  $W_i(t)$  и функциями Радемахера  $r_i(t)$ :

$$\begin{aligned}
 W_0(t) &= r_0(t); & W_1(t) &= r_1(t); \\
 W_2(t) &= (r_2(t))^1 (r_1(t))^0; & W_3(t) &= (r_2(t))^1 (r_1(t))^1; \\
 W_4(t) &= (r_3(t))^1 (r_2(t))^0 (r_1(t))^0; \\
 W_5(t) &= (r_3(t))^1 (r_2(t))^0 (r_1(t))^1; \\
 &\dots\dots\dots \\
 W_n(t) &= (r_q(t))^\alpha (r_{q-1}(t))^\beta (r_{q-2}(t))^\gamma \dots
 \end{aligned}$$

Здесь  $q = \text{int}(\log_2 n) + 1$ , где  $\text{int}$  означает взятие наибольшего целого;  $2^{q-1}\alpha + 2^{q-2}\beta + 2^{q-3}\gamma + \dots = n$ , т.е.  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  – двоичное разложение числа  $n$ .

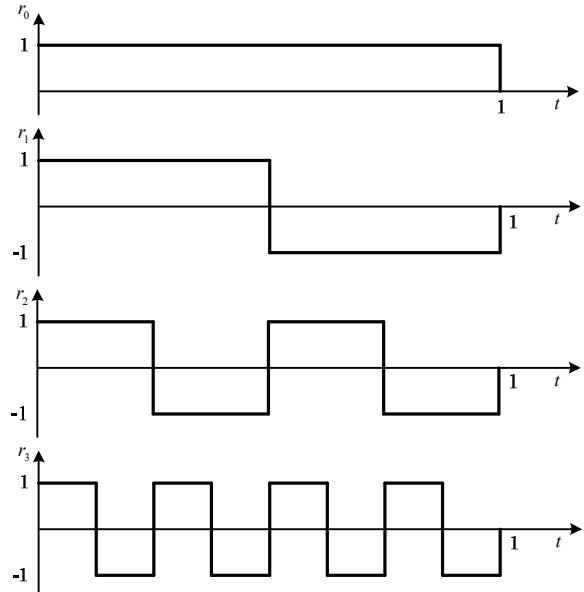


Рис. 1. Система ортонормированных функций Радемахера

Первые пять членов системы ортонормированных функций Уолша представлены на рис. 2.

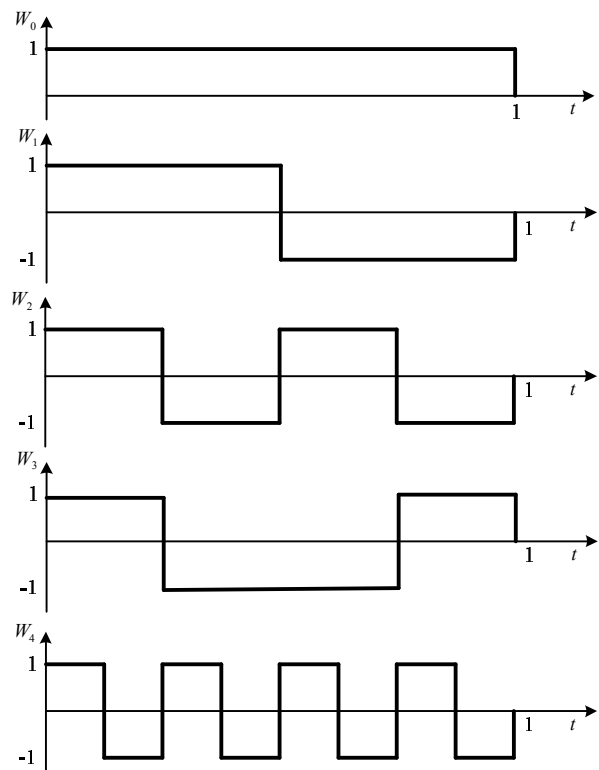


Рис. 2. Система ортонормированных функций Уолша

### Метод идентификации с применением функций Уолша

Этот метод является методом пассивной идентификации. Здесь импульсная переходная функция (ИПФ) ГТД представляется в виде:

$$\omega(\tau) = \sum_{i=0}^n a_i W_i(\tau), \quad \tau \in [0; T), \quad (1)$$

где  $T$  – интервал определения функций Уолша.

Интервал определения функций Уолша  $T$  выбирается большим или равным эффективной длительности ИПФ. Выходной сигнал  $y^*(t)$ , рассчитанный по модели (1), определяется выражением свертки

$$y^*(t) = \sum_{i=0}^n a_i \int_0^T W_i(\tau) x(t-\tau) d\tau.$$

Определим среднеквадратическую ошибку  $\varepsilon^2$  рассогласования измеренного  $y(t)$  и модельного  $y^*(t)$  сигналов:

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 &= \frac{1}{L} \int_0^L [y(t) - y^*(t)]^2 dt = \\ &= \frac{1}{L} \int_0^L \left[ y(t) - \sum_{i=0}^n a_i \int_0^T W_i(\tau) x(t-\tau) d\tau \right]^2 dt, \quad (2) \end{aligned}$$

где  $L$  – длительность интервала наблюдения.

Определим коэффициенты разложения  $a_j$  из условия минимума выражения (2):

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_j} = 0, \quad j = \overline{0, n}. \quad (3)$$

Дифференцируя (2) и подставляя в (3) получим систему линейных уравнений для определения  $a_j$ :

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n a_i \int_0^L K_j(t) K_i(t) dt &= \int_0^L y(t) K_j(t) dt, \quad j = \overline{0, n}; \quad (4) \\ K_i(t) &= \int_0^T W_i(\tau) x(t-\tau) d\tau; \quad K_j(t) = \int_0^T W_j(\theta) x(t-\theta) d\theta. \end{aligned}$$

Для дискретных значений  $x(t)$  и  $y(t)$  измеряемых с частотой дискретизации  $\Delta$  систему уравнений (4) можно привести к виду [1]:

$$\sum_{i=0}^n a_i c_{ij} = b_j, \quad j = \overline{0, n}. \quad (5)$$

Коэффициенты  $c_{ij}$  и  $b_j$  вычисляются за формулами ( $j = \overline{0, n}$ ):

$$b_j = \Delta \sum_{k=1}^{L/\Delta} y^*(k\Delta) K_j(k\Delta); \quad (6)$$

$$c_{ij} = \Delta \sum_{k=1}^{L/\Delta} K_i(k\Delta) K_j(k\Delta); \quad i = \overline{0, n}; \quad (7)$$

$$K_j(k\Delta) = \Delta \sum_{s=1}^{T/\Delta} W_j(s\Delta) x(k\Delta - s\Delta); \quad k = \overline{1, L/\Delta}. \quad (8)$$

Период дискретизации  $\Delta$  согласно теореме Котельникова определяется граничной частотой

пропускания ГТД, т.е.  $\Delta = 1/f_{гр}$ . На практике  $f_{гр}$  часто бывает неизвестна. В этом случае величину  $\Delta$  можно ориентировочно оценить как [1]

$$\Delta = \frac{T_{\min}}{(5 \dots 10)},$$

где  $T_{\min}$  – ожидаемая минимальная постоянная времени объекта.

### Выбор оптимальных решающих правил алгоритмов идентификации

Выбор оптимальных решающих правил определяется прежде всего доступной априорной и апостериорной информацией. Доступной апостериорной информацией будем считать только идентифицируемые коэффициенты разложения ИПФ в ряд по функциям Уолша  $\{a_j\}$ . Обозначим необходимую в любом случае априорную информацию через алфавит ситуаций  $\{D_i\}$ . Рассмотрим различные варианты распознавания ситуации в ГТД в зависимости от объема априорной информации.

Проанализируем случай, когда известны лишь направления изменения величин коэффициентов разложения ИПФ при переходе от нормальной работы к помпажу. Тогда возможно применение весьма простой процедуры диагностирования, основанной на анализе знака отклонения контролируемого параметра от номинального значения. При этом для повышения надежности диагностирования целесообразно выделять интервалы  $(a_j^0 - \varepsilon_j, a_j^0 + \varepsilon_j)$  для каждого коэффициента разложения  $a_j$  с номинальным значением  $a_j^0$  и погрешностью определения  $\varepsilon_j$ . Закодируем случай  $a_j \in (a_j^0 - \varepsilon_j, a_j^0 + \varepsilon_j)$  величиной 0, случай  $a_j < a_j^0 - \varepsilon_j$  величиной -1, а случай  $a_j > a_j^0 + \varepsilon_j$  – величиной +1.

Информация о поведении коэффициентов разложения в различных ситуациях сводится в таблицу ситуаций, в которой столбцы соответствуют всем возможным ситуациям, а строки – всем коэффициентам разложения. В соответствующих клетках по приведенному правилу проставляются 0, +1 или -1.

В случае, когда известны значения коэффициентов разложения во всех ситуациях, каждое состояние диагностируемой системы можно представить в виде  $(n+1)$ -мерного вектора  $A$  с компонентами

$$\{a_{j0}, a_{j1}, \dots, a_{jn}\}.$$

Задача классификации ситуации  $\{D_i\}$  в этом случае формулируется следующим образом: требу-

ется отнести предъявляемую совокупность коэффициентов разложения к одному из заранее установленных ситуаций. В случае, когда имеется достаточная статистическая информация: априорные вероятности ситуаций  $P(D_i)$ , условные плотности значений признаков  $f(a_j/D_i)$ , причем эти распределения одномодальны, целесообразно применение статистических методов распознавания, например статистического метода минимального риска [1].

### Алгоритм и устройство идентификации помпажа ГТД

Принимая, в качестве диагностического признака помпажа коэффициенты разложения в ряд по функциям Уолша исследуемого процесса на фиксированном интервале, можно сформулировать алгоритм идентификации в виде:

1. Вводится новое измеренное значение процесса  $y_j^*$ .

2. За этим значением и  $(2^n - 1)$  предыдущим значениям процесса вычисляются текущие значения коэффициентов разложения по выражению (5).

3. Распознавание помпажа осуществляется путем сравнения текущих коэффициентов разложения с эталонными.

Ситуация считается выявленной, если модуль разности между текущими значениями коэффициентов разложения и соответствующими эталонными значениями не превосходит заданной величины – порога распознавания, определяемого на этапе формирования признаков по разбросу коэффициентов разложения для различных реализаций процессов в одной ситуации и погрешностям идентификации.

На рис. 3 показана функциональная схема устройства идентификации помпажа, которое реализует приведенный алгоритм.

Для вычисления функций Уолша  $W_i(t)$  в момент времени  $t \in [0, 1]$  можно воспользоваться выражением [5]:

$$W_i(t) = \begin{cases} +1, & \text{если } S_{i1} \oplus S_{i2} \oplus \dots \oplus S_{ik} = 0; \\ -1, & \text{если } S_{i1} \oplus S_{i2} \oplus \dots \oplus S_{ik} = 1, \end{cases}$$

где  $S_{it}$  – разряды, в которых при двоичном разложении  $i$  и  $t$  одновременно находятся единицы; знак  $\oplus$  означает сложение по модулю 2.

Процедура вычисления коэффициентов Уолша–Фурье довольно просто реализуется на элементах цифровой техники. На рис. 4 представлена схема устройства для вычисления коэффициентов Уолша–Фурье [5]. Это устройство содержит генератор тактовых импульсов (ГТИ), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), генератор функций Уолша

(ГФУ), преобразователь прямого кода в дополнительный (ППКД) и накапливающий сумматор (НС).

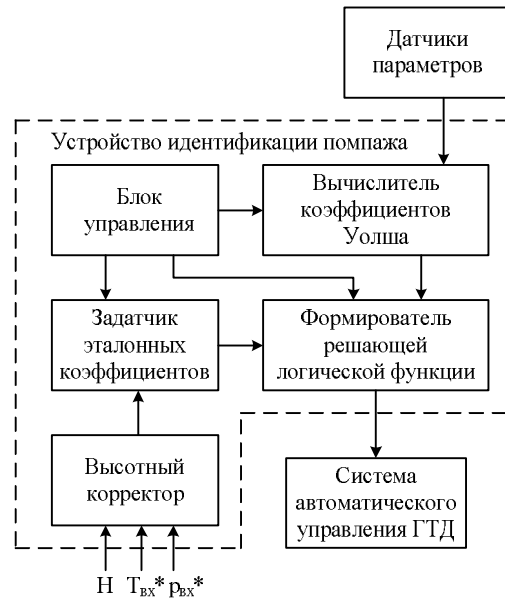


Рис. 3. Устройство идентификации помпажа

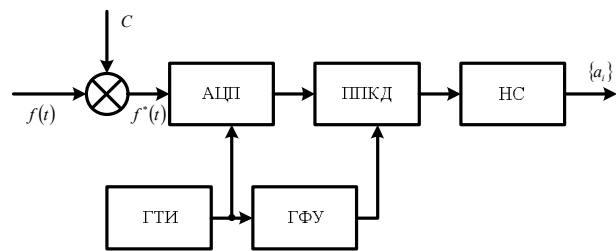


Рис. 4. Устройство вычисления коэффициентов Уолша–Фурье

Здесь вычисляются коэффициенты разложения  $a_i$  знакопостоянного сигнала

$$f^*(t) = f(t) + C \geq 0,$$

где  $C = \text{const}$ , которые, очевидно, для  $i \neq 0$  являются и коэффициентами Уолша – Фурье сигнала (функции)  $f(t)$ .

### Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность применения метода идентификации основанного на ортогональном разложении импульсной переходной функции в ряд по функциям Уолша. Разработан алгоритм и схема устройства идентификации помпажа, в котором в качестве диагностического признака приняты коэффициенты разложения по функциям Уолша. Формирование классов производится на основе анализа большого количества экспериментальных кривых изменения параметров рабочего процесса при помпаже и нормальной работе двигателя.

## Література

1. 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.

2. Методика визначення границі помпажу на змінених характеристиках компресора ТРД / М.С. Кулик, В.В. Панін, В.В. Ратинський, Б.М. Моїсєєв // Вісник Київського міжнародного університету цивільної авіації: зб. наук. пр.; М-во освіти і науки України, Нац. авіац. ун-т. – К., 2001. – № 2 (9). – С. 5-8.

3. Панін В.В. Метод и устройство распознавания предпомпажных явлений в компрессорах авиационных ГТД / В.В. Панін, И.Ф. Кинащук, В.И. Орланов // Актуальні проблеми автоматизації

та інформаційних технологій. – 2001. – № 4. – С. 63-69.

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

5. Многоуровневое управление динамическими объектами: монография / В.И. Васильев и др. – М.: Наука, 1987. – 309 с.

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.

Поступила в редакцію 31.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.М. Митрахович, ГК «Укрспецекспорт», Київ.

### ВИКОРИСТАННЯ ОРТОГОНАЛЬНИХ РОЗКЛАДАНЬ У ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОМПАЖНИХ ЯВИЩ В КОМПРЕСОРАХ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*В.В. Панін, С.В. Єнчев, Л.Г. Волянська*

У статті розглядається проблема ідентифікації помпажних явищ в компресорах авіаційних газотурбінних двигунів. Обґрунтовується можливість застосування методу розпізнавання помпажа за допомогою розкладу імпульсної перехідної функції двигуна в ряд ортонормованих функцій Уолша. Діагностичною ознакою помпажу прийняті коефіцієнти розкладу Уолша-Фур'є. Розроблені алгоритм і функціональна схема пристрою ідентифікації помпажу. Такий підхід дозволяє усунути можливість помилкового спрацьовування сигналізаторів помпажу внаслідок режиму роботи двигуна та зменшити розмірність простору діагностичних ознак.

**Ключові слова:** помпаж, авіаційний газотурбінний двигун, пристрій ідентифікації, функції Уолша; ортогональне розкладання.

### USAGE OF ORTOGONAL DECOMPOSITIONS IN TASKS OF SURGE PHENOMENA IDENTIFICATION IN AVIATION TURBO-ENGINES COMPRESSORS

*V.V. Panin, S.V. Enchev, L.G. Volyanska*

The article sets out to analyze the problem of the surge phenomena identification in compressors aviation turbo-engines. Surge recognition method is grounded by decomposition of impulsive transitional engine function by means of Walsh orthonormal functions application. As the diagnostic sign of surge are taken the coefficients of Walsh-Fourier decomposition. An algorithm and functional scheme of surge identification device is developed. Such approach allows to remove possibility of false wearing-out of surge signaling because of the sharp changing of the engine operations mode of and to decrease the space dimension of diagnostic signs.

**Keywords:** surge, aviation turbo-engine, identification device, Walsh function; ortogonal decomposition.

**Панін Владислав Вадимович** – д-р техн. наук, проф., декан механіко-енергетического факультета Аерокосміческого інститута Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: mef@nau.edu.ua.

**Єнчев Сергій Васильєвич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації і енергоменеджмента механіко-енергетического факультета Аерокосміческого інститута Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: esw@ukr.net.

**Волянська Лариса Георгієвна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри авіаційних двигателів механіко-енергетического факультета Аерокосміческого інститута Національного авіаційного університету, Київ, Україна.