

## ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА «НАКОПЛЕНИЯ ГИПОТЕЗ»

В. Н. ЕФАНОВ<sup>1</sup>, А. В. ПЕТУХОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>efanov@mail.rb.ru, <sup>2</sup>fafapatya@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

*Поступила в редакцию 9 июня 2014 г.*

**Аннотация.** Рассматривается задача оценки фактического технического состояния авиационного двигателя. Оценка предусматривает сравнение эксплуатационных параметров с их предельно допустимыми значениями. Для анализа нестационарных эксплуатационных параметров используется вейвлет-преобразование. В качестве диагностических признаков возможных дефектов используется топология скейлограмм. Для аналитического описания топологии предлагается метод аппроксимации контурных границ скейлограммы с заданными характеристиками яркости изображения. Решение задачи представления контурных границ в виде совокупности отдельных отрезков базируется на преобразовании Хюккеля. Для получения непрерывного замкнутого контура разработана методика «вложенных окон». Распознавание объектов на контурных изображениях осуществляется с использованием принципа «накопления гипотез». Для снижения размерности применяется иерархический подход, включающий два этапа накопления гипотез.

**Ключевые слова:** авиационный двигатель; техническое состояние; скейлограмма; преобразование Хюккеля; накопление гипотез.

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасной эксплуатации современных и перспективных газотурбинных двигателей в условиях непрерывного усложнения их конструкции, роста тепловых и механических нагрузок с учетом максимального использования индивидуальных потенциальных возможностей по ресурсу невозможно без применения стратегии технического обслуживания по фактическому состоянию. Реализация этой стратегии предусматривает сравнение параметров, характеризующих техническое состояние основных узлов двигателя во время эксплуатации, с их предельно допустимыми значениями. Используя результаты этого сравнения, определяется остаточный ресурс двигателя. С этой целью в процессе создания и доводки двигателя проводятся специальные, длительные ресурсные стендовые испытания двигателя, программа которых формируется с учетом всех возможных режимов полета летательных аппаратов. В том числе в программе стендовых испытаний предусматривается выполнение заданного количества

типовых циклов работы двигателя на тяжелых режимах. Тем не менее на основе таких испытаний невозможно в дальнейшем оценить фактическое техническое состояние деталей конкретного двигателя, поскольку полагается, что после изготовления основных деталей их техническое состояние в процессе эксплуатации изменяется одинаковым образом, в соответствии с обобщенным типовым полетным циклом. На самом деле авиационные двигатели эксплуатируются в специфических условиях, которые значительно отличаются как от работы на стенде, так и от типовых полетных условий. Специфика этих условий определяется высокой скоростью изменения во времени и пространстве действующих на двигатель внешних факторов, которые по-разному влияют на техническое состояние и на эксплуатационную надежность узлов, агрегатов и отдельных деталей двигателя в зависимости от причин возникновения указанных факторов. С этой точки зрения факторы обычно делят на конструктивно-производственные, которые определяют исходное качество изделия, и эксплуатационные, которые отражают изменение тех-

нического состояния в процессе эксплуатации. Конструктивно-производственные факторы включают схемные и конструктивные решения, технологию изготовления деталей и узлов, сборки и испытания двигателей, а также показатели качества производства.

Эксплуатационные факторы зависят от того, в каком режиме используется авиационный двигатель – в полете, на земле, на испытательном стенде. В полете на системы, агрегаты и детали двигателя действуют факторы, связанные с особенностями применения и условиями летной эксплуатации воздушного судна, климатические факторы и факторы, связанные с качеством горюче-смазочных материалов. Первая группа факторов объединяет аэродинамические нагрузки, перегрузки, давление, вибрацию, акустические нагрузки, аэродинамическое нагревание, электрические нагрузки, режимы работы авиационных двигателей и функциональных систем, а также изменение физико-химических свойств материалов с течением времени. Для многих материалов процесс старения протекает без видимых признаков ухудшения свойств материалов. Однако эти изменения накапливаются, их скорость может существенно изменяться под воздействием тепла, вибрации, кислорода, озона, влаги и т.д., что приводит к внезапному разрушению деталей. К группе климатических факторов относятся: температура, давление и влажность атмосферного воздуха, суточное и годовое колебание этих показателей, их изменения и перепады по высоте и длине трассы, осадки (дождь, снег, лед, туман), насыщенность воздуха агрессивными веществами (соли, щелочи и др.). Качество горюче-смазочных материалов зависит от степени их окисления и старения, загрязнения посторонними частицами, наличия влаги и т.д.

К факторам, которые влияют на техническое состояние авиационного двигателя при его эксплуатации на земле, дополнительно относятся характеристики состояния аэродромов: запыленность атмосферы, качество покрытия взлетно-посадочных полос и рулежных дорожек, степень их чистоты, наличие на них осадков и т.д. В свою очередь, при техническом обслуживании и испытаниях авиационного двигателя на стенде на первый план выходят факторы, определяющие качество работы инженерно-технического состава, его квалификация, опыт, оснащенность современной контрольно-измерительной аппаратурой, умение качественно выполнять работы по обслуживанию и ремонту, транспортировке и хранению, своевременно выявлять и устранять возможные дефекты.

Перечисленные факторы приводят к появлению деградационных процессов, которые изменяют техническое состояние авиационного двигателя, что может стать причиной частичной или полной потери его работоспособности. Сложность выявления подобных процессов заключается в том, что одновременно протекают разнотемповые процессы – быстротекущие, протекающие на средней скорости и медленно протекающие. Периодичность быстротекущих процессов измеряется долями секунд. Их появление обусловлено сложными физическими взаимодействиями, которые возникают между различными механизмами в течение рабочего цикла газотурбинного двигателя. К быстротекущим процессам относятся вибрация узлов, вызванная неуравновешенностью вращающихся масс роторов турбокомпрессоров и агрегатов; вибрация трубопроводов, обусловленная как внешними механическими воздействиями, так и колебаниями из-за параметрических возбуждений; изменение сил трения в подшипниках и других подвижных элементах агрегатов, например, насосов; пульсация давления рабочей жидкости из-за неравномерной работы насоса; акустические колебания, вызванные истечением газа через выхлопную систему двигателя. Длительность процессов со средней скоростью протекания определяется временем непрерывной работы двигателя и может лежать в диапазоне от нескольких минут до нескольких часов. Они приводят к периодическому изменению параметров рабочего процесса в двигателе, которое может иметь обратимый и необратимый характер. Так, повторяющиеся от полета к полету изменения температуры окружающей среды и рабочей жидкости в системах двигателя, изменение температуры его рабочих узлов и корпуса, изменение давления воздуха в характерных сечениях являются обратимыми. В качестве необратимых процессов можно назвать изменения физических свойств рабочих жидкостей и конструкционных материалов, которые ускоряются в условиях повышенной температуры и вибрации. Наконец, медленные процессы протекают на протяжении всего периода эксплуатации двигателя. Характерными примерами таких процессов может служить систематический износ всех рабочих элементов, которые испытывают трение – подшипников, элементов конструкции двигателя, агрегатов, трубопроводов, соединений, а также коррозия металлических и старение неметаллических изделий. Эти процессы оказывают влияние на усталостную прочность материалов, изменение КПД компрессора и турбины, точность работы агрегатов, механизмов и других изделий.

Многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на объекты авиационной техники приводят к тому, что при одной и той же наработке или длительности эксплуатации двигателя имеют различное фактическое техническое состояние, что, естественно, влияет на уровень их надежности. Сложность задачи диагностики фактического технического состояния авиационного двигателя определяется многомодовой динамикой деградационных процессов, включающих ритмические составляющие с удаленными друг от друга частотами и низкочастотный тренд. Для корректной интерпретации результатов обработки таких нестационарных многокомпонентных процессов в данной работе предлагается методика оценки технического состояния авиационного двигателя, основанная на принципе «накопления гипотез» [1] при идентификации видов и степени развития дефектов.

#### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕДУРЫ АППРОКСИМАЦИИ КОНТУРНЫХ ГРАНИЦ СКЕЙЛОГРАММ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

В основу предлагаемой методики оценки технического состояния авиационного двигателя положено использование сигналов  $x_i(t)$ , ( $i = \overline{1, n}$ ) штатных датчиков в качестве источников информации для вычисления на борту летательного аппарата в реальном масштабе времени диагностических признаков, позволяющих судить о характере дефекта и степени его развития, а также локализовать место возникновения дефекта до того, как он начинает приобретать разрушительный характер. Как отмечалось выше, процессы, протекающие в авиационных двигателях, носят существенно нестационарный характер, в связи с чем для предварительной обработки сигналов датчиков необходимо использовать методы, способные анализировать их как в частотной, так и во временной области. К числу таких методов относится вейвлет-преобразование [2].

Результатом вейвлет-преобразования сигналов  $x_i(t)$  являются функции двух переменных

$$W_i(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x_i(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (1)$$

где  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  – система базисных функций, сконструированных из материнского (исходного) вейвлета  $\psi(t)$  за счет операций сдвига во

времени ( $b$ ) и изменения временного масштаба ( $a$ ).

В качестве материнского вейвлета используется достаточно обширный класс функций, включающий семейство классических вейвлетов Добеши, Гаусса, Морлета, Мейера и т. д. Только в пакете Wavelet Toolbox представлено полтора десятка материнских вейвлетов с множеством возможных вариантов. Графически вейвлет-преобразование задается в виде трехмерного объекта или двумерной проекции такого объекта, т.н. скейлограммы (рис. 1), которая представляет собой область с различными характеристиками яркости отдельных элементов изображения.



Рис. 1. Скейлограмма вейвлет-преобразования

Главным источником информации для автоматического распознавания дефекта является положение, величина и взаимозависимость яркостей соседних областей скейлограммы, соответствующих локальным максимумам вейвлет-преобразования. На основе этой информации можно сформировать диагностические признаки для всех наиболее характерных видов дефектов авиационных двигателей. При этом необходимо использовать такое аналитическое описание топологии скейлограммы, которое позволяет выделить наиболее существенные элементы и исключить избыточную информацию.

Одним из наиболее перспективных подходов к решению этой достаточно сложной задачи является метод выделения резких (скачкообразных) перепадов яркости на реальных полутоновых изображениях. Для этого необходимо найти границу такого перепада в выделенной области скейлограммы в простейшем случае в виде отрезка прямой линии. Совокупность таких прилегающих друг к другу отрезков позволяет построить контур произвольной криволинейной формы, ограничивающий зону скейлограммы с заданными характеристиками яркости изображения. Решение задачи представления контурных границ в виде совокупности отдельных отрезков связано с необходимостью выработки

правила, позволяющего объективно оценить принадлежность тех или иных контурных точек к данному отрезку. Дело в том, что яркость отдельных точек в пиксельном представлении скейлограммы имеет достаточно случайный характер, обусловленный как стохастическими свойствами исходного сигнала, так и погрешностями, внесенными различными помехами в тракте передачи данных и искажениями, связанными с процедурой вейвлет-преобразования. На рис. 2 представлена характерная картина пиксельного изображения, которое аппроксимирует фрагмент скейлограммы в виде круглого окна. Цифрами на этом изображении обозначены значения яркости в соответствующей точке.

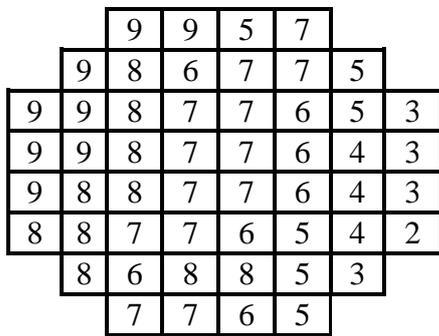


Рис. 2. Фрагмент пиксельного изображения скейлограммы

Кроме того, невозможно априорно задать порог перепадов яркости, который будет служить критерием для деления изображения на различные зоны. Отсюда следует, что при построении контурной границы необходимо выбранный фрагмент реального изображения аппроксимировать идеализированным перепадом. Если такую аппроксимацию удастся сделать достаточно точно, то считается, что в этом месте имеется перепад с найденными параметрами. При этом в качестве критерия точности аппроксимации обычно используется величина среднеквадратичного отклонения. Для аналитического решения задачи среднеквадратичной аппроксимации воспользуемся методом Хьюккеля [3], основанном на разложении исследуемого фрагмента изображения в ряд по совокупности специальных двумерных базисных функций.

Рассмотрим фрагмент скейлограммы сигнала  $x_i(t)$  в виде круглого окна, которое аппроксимировано множеством  $G_i$  клеток, как это показано на рис. 2. Значение яркости в пределах каждой клетки  $l_i \in G_i$  принимается постоянным и определяется величиной вейвлет-преобразования  $W_i(b_i, a_i)$  в центре этой клетки.

Модель ступенчатой границы скачка яркости для такого окна представим в виде трехмерной функции, имеющей форму ступеньки (рис. 3). На этом рисунке  $g$  – значение меньшей яркости в рассматриваемой модели, а  $g+h$  – большей яркости. Отображение ступенчатой границы скачка яркости для круглого окна на плоскость скейлограммы имеет вид, показанный на рис. 4.

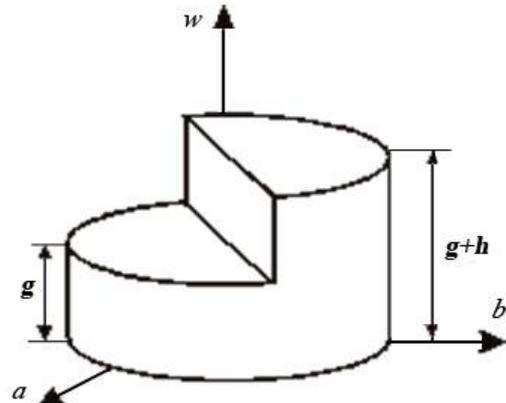


Рис. 3. Модель ступенчатой границы скачка яркости для круглого окна

Аналитическое описание двумерной модели ступенчатой границы скачка яркости для круглого окна имеет вид

$$V_i(b, a, \rho_i, \theta_i, g_i, h_i) = \begin{cases} g_i, b \cos \theta_i + a \sin \theta_i < \rho_i; \\ g_i + h_i, b \cos \theta_i + a \sin \theta_i \geq \rho_i, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\theta_i$  и  $\rho_i$  – полярные координаты точки перепада, ближайшей к центру исследуемой круговой области.

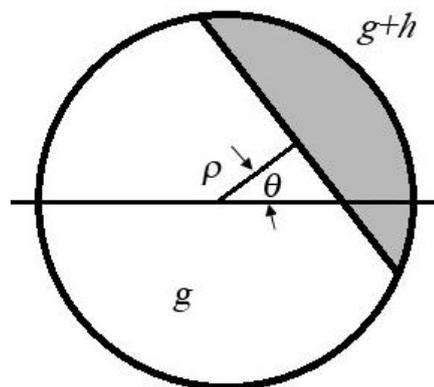


Рис. 4. Двумерная модель ступенчатой границы скачка яркости для круглого окна

Критерием оптимальности аппроксимации служит квадрат гильбертова расстояния между  $W_i(b, a)$  и  $V_i(b, a)$ . Если обозначить исследуемую круговую область следующим образом:

$\Omega_i = \{(b, a) | b^2 + a^2 \leq R^2\}$ , то этот критерий приобретает вид

$$\varepsilon_i(\rho_i, \theta_i, g_i, h_i) = \iint_{\Omega_i} [W_i(b, a) - V_i(b, a, \rho_i, \theta_i, g_i, h_i)]^2 db da. \quad (3)$$

Минимизация функционала (3) позволяет определить параметры  $(\rho_i, \theta_i, g_i, h_i)$ , которые задают положение отрезка искомого контурной границы. В методе Хюккеля с этой целью используется разложение реального  $W_i(b, a)$  и идеального  $V_i(b, a)$  изображения в ряд по системе из восьми базисных функций следующего вида

$$\begin{aligned} H_0(b, a) &= \sqrt{\frac{2}{3\pi}} \cdot Q(r)(1 + 2r^2); \\ H_1(b, a) &= 2\sqrt{\frac{1}{3\pi}} \cdot Q(r)(5r^2 - 1); \\ H_2(b, a) &= 2\sqrt{\frac{1}{3\pi}} \cdot Q(r)r \cos \varphi; \\ H_3(b, a) &= 2\sqrt{\frac{1}{3\pi}} \cdot Q(r)r \sin \varphi; \\ H_4(b, a) &= 2\sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot Q(r)r^2 \cos 2\varphi; \\ H_5(b, a) &= 2\sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot Q(r)r^2 \sin 2\varphi; \\ H_6(b, a) &= \sqrt{\frac{15}{\pi}} \cdot Q(r)(4r^2 - 2)r \cos \varphi; \\ H_7(b, a) &= \sqrt{\frac{15}{\pi}} \cdot Q(r)(4r^2 - 2)r \sin \varphi, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $Q(r) = \sqrt{1 - r^2}$ ;  $r = \sqrt{b^2 + a^2}$ ;  $\varphi = \arctg \frac{b}{a}$ .

Используя данные базисные функции, находим коэффициенты разложения для реального изображения и искомого идеального ступенчатого перепада

$$\begin{aligned} \alpha_k^{(i)} &= \iint_{\Omega_i} H_k(b, a) W_i(b, a) db da; \\ \beta_k^{(i)}(\rho_i, \theta_i, g_i, h_i) &= \iint_{\Omega_i} H_k(b, a) V_i(b, a, \rho_i, \theta_i, g_i, h_i) db da; \\ &\quad (k = 0, 1, \dots, 7). \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда критерий оптимизации (3) принимает вид

$$\varepsilon_i(\rho_i, \theta_i, g_i, h_i) = \sum_{k=0}^7 [\alpha_k^{(i)} - \beta_k^{(i)}(\rho_i, \theta_i, g_i, h_i)]^2. \quad (6)$$

Минимизация (6) может осуществляться с использованием стандартных приемов. Учитывая квадратичную форму этого критерия, эффективными оказываются градиентные методы. Следует отметить, что в качестве параметров оптимизации выступают величины  $g_i$  и  $h_i$ , которые аппроксимируют (усредняют) рельеф вейвлет-преобразования. Эти параметры позволяют судить о том, существует ли в данной области перепад яркости заданной интенсивности. Для этого найденную величину  $h_i$  сравнивают с заданным порогом  $h_i^{(зад)}$ . Если выполняется условие

$$h_i \geq h_i^{(зад)}, \quad (7)$$

то считается, что перепад имеется, и граница зон различной яркости задается отрезком  $(\rho_i, \theta_i)$ . В противном случае в данной области перепада нет, и для построения контурной границы необходимо изменить исходное положение круглого окна.

Большое значение при построении контурных границ в виде совокупности отдельных отрезков имеет вопрос сопряжения этих отрезков для получения непрерывного замкнутого контура. С этой целью используются самые разнообразные методы, начиная со стандартных методов сопряжения типовыми кривыми линиями – окружностями, параболой и т.д., и кончая построением отрезков с нечеткими, размытыми концами. Основным недостатком всех этих методов заключается в том, что построенные границы не отвечают выбранному критерию (3). Чтобы избежать этого недостатка, предлагается метод «вложенных окон». Суть этого метода заключается в следующем. Очередное круглое окно размещается на плоскости скейлограммы таким образом, чтобы отрезки, разделяющие зоны с различной яркостью в каждом из двух смежных окон, пересекались, причем точка пересечения  $(b_0^{(i)}, a_0^{(i)})$  должна принадлежать к области, ограниченной этими двумя окнами, т.е.

$$(b_0^{(i)}, a_0^{(i)}) \in \Omega_k^{(i)} \cup \Omega_{k+1}^{(i)}, \quad (8)$$

как это показано на рис. 5.

С учетом сделанных замечаний процедура построения контурных границ в виде совокупности отдельных отрезков будет включать две операции: операцию построения начального положения круглого окна в зоне предполагаемого перепада яркости с параметрами  $g_i^{(зад)}$  и  $h_i^{(зад)}$  и операцию последовательного размещения круглых окон, обеспечивающих выполнение условий (7) и (8).

Для определения начального положения круглого окна рассмотрим алгоритм направленного выхода в искомую зону скейлограммы, аналогичный методу конфигураций. Введем величину, которая будет характеризовать степень близости к зоне с заданной яркостью  $(g_i^{(зад)} + h_i^{(зад)})$

$$\Delta_i(b, a) = (g_i^{(зад)} + h_i^{(зад)}) - W_i(b, a). \quad (9)$$

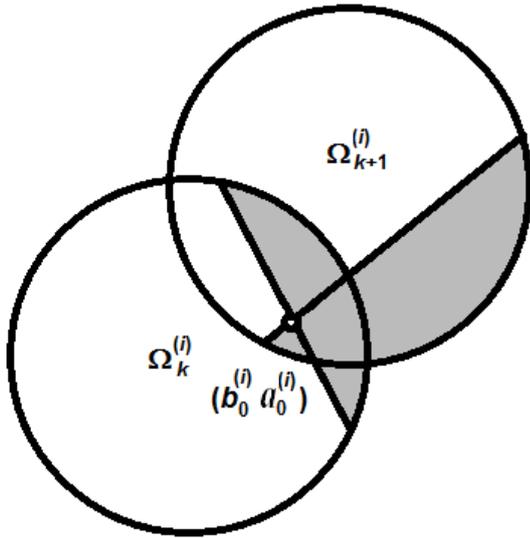


Рис. 5. Сопряжение отрезков по методу «вложенных окон»

Очевидно, что внутри зоны с яркостью, превышающей заданную, критерий (9) принимает значения  $\Delta_i(b, a) < 0$ , вне этой зоны -  $\Delta_i(b, a) > 0$ , а на границе  $\Delta_i(b, a) = 0$ . Алгоритм предусматривает выполнение последовательности шагов с целью определения координат на скейлограмме, приближающихся по критерию (9) к искомой зоне. Анализируемые точки разделяются на промежуточные  $\gamma_{pq}^{(i)}$  (где  $p=1, 2, \dots$  – номер шага (конфигурации), а  $q=1, 2$  – номер координаты, по которой осуществляется поиск) и опорные  $\sigma_p^{(i)}$ . Под конфигурацией понимают совокупность шагов, выполняемых между двумя последовательными опорными точками.

Первая конфигурация строится следующим образом. Выбираем произвольную точку скейлограммы  $\sigma_1^{(i)}(b_1, a_1)$ . Считаем, что улучшение критерия (9) будет всюду, где значение  $\Delta_i(\sigma_p^{(i)})$  положительно и меньше  $\Delta_i(\sigma_1^{(i)})$ .

$$0 < \Delta_i(\sigma_p^{(i)}) < \Delta_i(\sigma_1^{(i)}). \quad (10)$$

Из точки  $\sigma_1^{(i)}(b_1, a_1)$  делается шаг в сторону увеличения координаты  $b$ . Если полученная точка  $(b_1 + \epsilon b, a_1)$  удовлетворяет условию (10), то эта точка принимается в качестве промежуточной точки  $\gamma_{11}^{(i)}$ . Если условие (10) не соблюдается, то совершается шаг в сторону уменьшения координаты  $b$ . Полученная точка также проверяется на выполнение условия (10). Если условие (10) выполняется, то эта точка принимается в качестве промежуточной. В противном случае за промежуточную принимается исходная точка  $\sigma_1^{(i)}(b_1, a_1)$ . Аналогичной процедуре подвергается полученная промежуточная точка  $\gamma_{11}^{(i)}$  по отношению ко второй координате  $a$ . Полученная точка  $\gamma_{12}^{(i)}$  принимается за вторую опорную точку  $\sigma_2^{(i)} = \gamma_{12}^{(i)}$ . Причем очевидно, что  $0 < \Delta_i(\sigma_2^{(i)}) < \Delta_i(\sigma_1^{(i)})$ . Этим завершается построение первой конфигурации.

Аналитическую запись изложенной процедуры для произвольной  $p$ -й конфигурации представим в следующем виде. Для первой промежуточной точки, если выполняется условие

$$0 < \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}(b_{p-1} + \epsilon b, a_{p-1})) < \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}),$$

$$\text{то } \gamma_{p1}^{(i)} = \sigma_{p-1}^{(i)}(b_{p-1} + \epsilon b, a_{p-1}).$$

$$\text{Если } \begin{cases} \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}(b_{p-1} + \epsilon b, a_{p-1})) > \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}), \\ 0 < \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}(b_{p-1} - \epsilon b, a_{p-1})) < \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}), \end{cases}$$

$$\text{то } \gamma_{p1}^{(i)} = \sigma_{p-1}^{(i)}(b_{p-1} - \epsilon b, a_{p-1}).$$

Наконец, если

$$\begin{cases} \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}(b_{p-1} + \epsilon b, a_{p-1})) > \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}), \\ \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}(b_{p-1} - \epsilon b, a_{p-1})) > \Delta_i(\sigma_{p-1}^{(i)}), \end{cases}$$

$$\text{то } \gamma_{p1}^{(i)} = \sigma_{p-1}^{(i)}(b_{p-1}, a_{p-1}).$$

Аналогично, для второй промежуточной точки, если выполняется условие

$$0 < \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}(b_{p-1}, a_{p-1} + \epsilon a)) < \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}),$$

$$\text{то } \gamma_{p2}^{(i)} = \gamma_{p1}^{(i)}(b_{p-1}, a_{p-1} + \epsilon a).$$

$$\text{Если } \begin{cases} \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}(b_{p-1}, a_{p-1} + \epsilon a)) > \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}), \\ 0 < \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}(b_{p-1}, a_{p-1} - \epsilon a)) < \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}), \end{cases}$$

$$\text{то } \gamma_{p2}^{(i)} = \gamma_{p1}^{(i)}(b_{p-1}, a_{p-1} - \epsilon a).$$

$$\text{И если } \begin{cases} \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}(b_{p-1}, a_{p-1} + \epsilon a)) > \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}), \\ \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}(b_{p-1}, a_{p-1} - \epsilon a)) > \Delta_i(\gamma_{p1}^{(i)}), \end{cases}$$

$$\text{то } \gamma_{p2}^{(i)} = \gamma_{p1}^{(i)}(b_{p-1}, a_{p-1}).$$

Если построение предыдущей конфигурации завершилось успешно, то предпринимается попытка продвижения на двойное расстояние, т. е. в точку  $\sigma_{p+1}^{(i)} = 2\sigma_p^{(i)} - \sigma_{p-1}^{(i)}$ . Если в этой точке соблюдается условие

$$0 < \Delta_i(\sigma_{p+1}^{(i)}) < \Delta_i(\sigma_p^{(i)}),$$

то она принимается за очередную опорную точку. Если

$$\Delta_i(\sigma_{p+1}^{(i)}) > \Delta_i(\sigma_p^{(i)}),$$

то продвижение не осуществляется и построение очередной конфигурации начинается с предыдущей опорной точки  $\sigma_p^{(i)}$ .

Как отмечалось, построение конфигураций заканчивается в точке, где критерий (9) меняет знак. Если в процессе поиска совершено  $m$  конфигураций, то опорная точка  $\sigma_m^{(i)}$  лежит в искомой зоне, а предыдущая опорная точка  $\sigma_{m-1}^{(i)}$  – вне нее. Тогда центр первого круглого окна в зоне предполагаемого перепада яркости скейлограммы будет лежать в точке  $\sigma_{m-1}^{(i)}$ , а его радиус будет равен

$$R_i = \text{dist}(\sigma_{m-1}^{(i)}, \sigma_m^{(i)}) = \sqrt{(b_m - b_{m-1})^2 + (a_m - a_{m-1})^2}. \quad (11)$$

После построения первого круглого окна необходимо осуществить последовательное размещение следующих окружностей с использованием предложенного метода «вложенных окон». Проиллюстрируем эту операцию с помощью рис. 6.

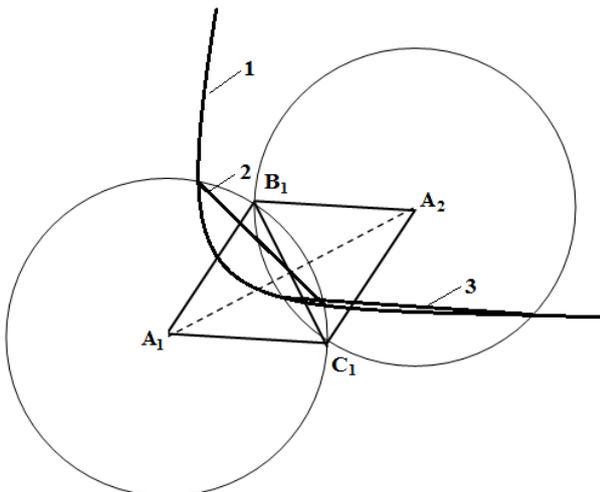


Рис. 6. Построение последовательности «вложенных окон»

На этом рисунке цифрой 1 обозначена условная граница зон с различной яркостью. Первое круглое окно представляет собой окружность с центром в точке  $A_1$ . Выбираем точку  $B_1$ ,

расположенную в зоне, в которой критерий (9) принимает отрицательные значения  $\Delta_i(B_1) < 0$ . Построим равносторонний треугольник со стороной  $A_1B_1$  и третьей вершиной  $C_1$ . Найдем точку  $C_1$  как результат пересечения двух прямых, проведенных к стороне  $A_1B_1$  под равными углами  $60^\circ$ . Обозначим угловой коэффициент прямой  $A_1B_1$  через  $k_0$ , тогда уравнения прямых  $A_1C_1$  и  $B_1C_1$  будут соответственно

$$a_{C_1} - a_{A_1} = \frac{k_0 - \sqrt{3}}{1 + \sqrt{3}k_0}(b_{C_1} - b_{A_1});$$

$$a_{C_1} - a_{B_1} = \frac{k_0 + \sqrt{3}}{1 - \sqrt{3}k_0}(b_{C_1} - b_{B_1}). \quad (12)$$

Решая эту систему уравнений, находим координаты точки  $C_1$

$$\begin{aligned} b_{C_1} &= 0,5[b_{B_1} + b_{A_1} + \sqrt{3}(a_{B_1} - a_{A_1})]; \\ a_{C_1} &= 0,5[a_{B_1} + a_{A_1} - \sqrt{3}(b_{B_1} - b_{A_1})]. \end{aligned} \quad (13)$$

Дальнейшее построение заключается в «зеркальном» отражении той из вершин треугольника  $A_1B_1C_1$ , которая находится в одинаковых условиях с соседней вершиной. Применительно к рассматриваемому случаю такой вершиной является точка  $A_1$ . В результате образуется новый треугольник  $A_2B_1C_1$ . При нахождении точки  $A_2$  сравниваются точки  $C_1$  и  $B_1$ . Рассмотрим два случая. Первый случай соответствует рис. 6, когда  $\Delta_i(C_1)\Delta_i(B_1) < 0$ , т. е. точки  $C_1$  и  $B_1$  находятся по разные стороны границы 1. При этом координаты точки  $A_2$  находятся как координаты вершины треугольника по формулам

$$b_{C_2} = b_{C_1} + b_{B_1} - b_{A_1}; a_{C_2} = a_{C_1} + a_{B_1} - a_{A_1}. \quad (14)$$

Второй случай соответствует условию  $\Delta_i(C_1)\Delta_i(B_1) > 0$ , когда точки  $C_1$  и  $B_1$  находятся по одну сторону границы 1. В этом случае точка  $A_2$  будет отражением точки  $B_1$  в сторону  $A_1C_1$ . Координаты точки  $A_2$  находятся аналогично (14)

$$b_{A_2} = b_{C_1} + b_{A_1} - b_{B_1}; a_{A_2} = a_{C_1} + a_{A_1} - a_{B_1}. \quad (15)$$

Найденная точка  $A_2$  является центром нового круглого окна. Отрезки 2 и 3 на рис. 6 отображают ступенчатые границы скачков яркости для соответствующих круглых окон. Эти отрезки являются начальными элементами искомой контурной границы. Для ее продолжения необходимо осуществить переобозначение точек. В первом случае точка  $B_1$  обозначается через  $B_2$ , а точка  $C_1$  – через  $C_2$ , во втором случае точка  $A_1$  – через  $A_2$ , точка  $C_1$  – через  $B_2$ , а точка  $A_2$  – через  $C_2$ . В обоих случаях получается треугольник с вершинами  $A_2B_2C_2$ . Далее поступаем аналогично

предыдущему случаю по отношению к треугольнику  $A_2B_2C_2$ .

Обобщая сказанное, получим следующий алгоритм построения контурной границы перепадов яркости на исследуемой скейлограмме. Пусть найдена  $N$ -я точка  $A_N$  центра кругового окна и построен треугольник с вершинами  $A_N, B_N, C_N$ . Тогда следующая точка  $A_{N+1}$  и следующий треугольник находятся в таком порядке. Точка  $C_N$  сравнивается с точкой  $B_N$ . Если  $\Delta_i(C_N)\Delta_i(B_N) < 0$ , то точка  $A_{N+1}$  находится отражением точки  $A_N$  в сторону  $B_N C_N$ . Координаты точки  $A_{N+1}$  находятся по формулам

$$\begin{aligned} b_{A_{N+1}} &= b_{C_N} + b_{B_N} - b_{A_N}; \\ a_{A_{N+1}} &= a_{C_N} + a_{B_N} - a_{A_N}. \end{aligned} \quad (16)$$

Если  $\Delta_i(C_N)\Delta_i(B_N) > 0$  и  $\Delta_i(C_N)\Delta_i(A_N) < 0$ , то точка  $A_{N+1}$  получается отражением точки  $B_N$  в сторону  $A_N C_N$ . Координаты точки  $A_{N+1}$  находятся по формулам

$$\begin{aligned} b_{A_{N+1}} &= b_{C_N} + b_{A_N} - b_{B_N}; \\ a_{A_{N+1}} &= a_{C_N} + a_{A_N} - a_{B_N}. \end{aligned} \quad (17)$$

Описанная процедура продолжается до получения замкнутой контурной границы перепадов яркости.

#### РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА КОНТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА «НАКОПЛЕНИЯ ГИПОТЕЗ»

Оценка фактического технического состояния авиационного двигателя предусматривает сопоставление полученных контурных изображений с некоторыми эталонами, которые соответствуют определенным видам и известной степени развития дефектов. Центральным вопросом при решении задачи распознавания коллекции цифровых изображений на плоскости является извлечение из изображений идентификационных признаков, в качестве которых выступают характерные элементы этих изображений, и группировка изображений в соответствии со значениями признаков (кластеризация). Учитывая высокую вычислительную сложность такой процедуры, для снижения размерности применяется иерархический подход, предусматривающий первичное сопоставление изображений, исходя из одинакового количества контуров произвольной формы, с последующим целостным сопоставлением всей совокупности контурных границ перепадов яркости.

Пусть имеется множество гипотез  $Z$  о возможном техническом состоянии исследуемого

двигателя и множество эталонных скейлограмм  $S$ , которые характеризуют остаточный ресурс данного типа двигателей. Считаем, что каждой гипотезе  $z \in Z$  соответствует определенное подмножество скейлограмм  $S(z) \subseteq S$ . При этом задача выбора гипотезы  $z_0 \in Z$ , соответствующей тому, что исследуемая скейлограмма  $s_0$  принадлежит некоторому классу эталонных скейлограмм  $S(z_0)$ , ставится и решается как задача поиска гипотезы, подмножество скейлограмм которой имеет максимальное сходство с исследуемой скейлограммой  $s_0$ :

$$z_0 = \arg \max_{z \in Z} O(s_0, S(z)), \quad (18)$$

где  $O(s_0, S(z))$  – функция, определяющая сходство в коллекции цифровых изображений.

Как отмечалось выше, решение задачи (18) целесообразно осуществлять в два этапа. На первом этапе выполняется ранжирование множества эталонных скейлограмм, имеющих одинаковое количество  $M_0$  идентификационных признаков (контурных границ перепадов яркости) с исследуемой скейлограммой  $s_0$ . Ранжирование производится в соответствии со следующим критерием, оценивающим совпадение контурных границ перепадов яркости и величин таких перепадов в эталонной и исследуемой скейлограммах

$$\begin{aligned} O_I(s_0, S_k(z)) &= \lambda_1 \left( \sum_{j=1}^{M_0} \left[ \left( b_j^{(k)*} - b_j^{(0)*} \right)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left( a_j^{(k)*} - a_j^{(0)*} \right)^2 \right] \right) + \\ &\quad + \lambda_2 \left( \sum_{j=1}^{M_0} \left[ \left( g_j^{(k)} - g_j^{(0)} \right)^2 + \left( h_j^{(k)} - h_j^{(0)} \right)^2 \right] \right); \\ S_k(z) &\in S; \end{aligned} \quad (19)$$

здесь  $b_j^{(k)*}, a_j^{(k)*}, b_j^{(0)*}, a_j^{(0)*}$  – координаты центра тяжести  $j$ -й контурной области перепада яркости соответственно, в эталонной и исследуемой скейлограммах.

Для вычисления координат центров тяжести можно воспользоваться одним из трех приемов:

- в простейшем случае центр тяжести рассматривается как центр масс системы угловых точек, в которых пересекаются отрезки, образующие контурную границу перепада яркости

$$b_j^{(k)*} = \frac{\sum_{l=1}^{m_j^{(k)}} b_{jl}^{(k)}}{m_j^{(k)}}, \quad a_j^{(k)*} = \frac{\sum_{l=1}^{m_j^{(k)}} a_{jl}^{(k)}}{m_j^{(k)}};$$

где  $m_j^{(k)}$  – число угловых точек в  $j$ -й контурной области перепада яркости на скейлограмме  $S_k(z)$ ;

- при использовании в качестве центра тяжести центра масс многоугольника, ограничивающего соответствующую контурную область перепада яркости, каждую сторону многоугольника можно заменить одной точкой — серединой этого отрезка с массой, равной длине этого отрезка

$$b_j^{(k)*} = \frac{\sum_{l=1}^{m_j^{(k)}} sb_{jl}^{(k)} r_{jl}^{(k)}}{\sum_{l=1}^{m_j^{(k)}} r_{jl}^{(k)}}, \quad a_j^{(k)*} = \frac{\sum_{l=1}^{m_j^{(k)}} sa_{jl}^{(k)} r_{jl}^{(k)}}{\sum_{l=1}^{m_j^{(k)}} r_{jl}^{(k)}};$$

где  $sb_{jl}^{(k)}$ ,  $sa_{jl}^{(k)}$  – координаты середины  $l$ -й стороны  $j$ -го многоугольника,  $r_{jl}^{(k)}$  – длина этой стороны,  $m_j^{(k)}$  – число сторон  $j$ -го многоугольника;

- наконец, если речь идет непосредственно о центре тяжести многоугольника, то вначале необходимо осуществить его триангуляцию, т.е. разбить многоугольник на треугольники, найти центры тяжести каждого треугольника, и только после этого – координаты центра тяжести многоугольника

$$b_j^{(k)*} = \frac{\sum_{l=1}^{m_j^{(k)}} cb_{jl}^{(k)} p_{jl}^{(k)}}{P_j^{(k)}}, \quad a_j^{(k)*} = \frac{\sum_{l=1}^{m_j^{(k)}} ca_{jl}^{(k)} p_{jl}^{(k)}}{P_j^{(k)}};$$

где

$$cb_{jl}^{(k)} = \frac{[b_{jl}^{(k)}]_1 + [b_{jl}^{(k)}]_2 + [b_{jl}^{(k)}]_3}{3},$$

$$ca_{jl}^{(k)} = \frac{[a_{jl}^{(k)}]_1 + [a_{jl}^{(k)}]_2 + [a_{jl}^{(k)}]_3}{3} \quad \text{– координаты центра тяжести } l\text{-го треугольника в триангуляции } j\text{-го многоугольника, при этом } ([b_{jl}^{(k)}]_1; [a_{jl}^{(k)}]_1), ([b_{jl}^{(k)}]_2; [a_{jl}^{(k)}]_2), ([b_{jl}^{(k)}]_3; [a_{jl}^{(k)}]_3) \text{ – координаты вершин треугольника, } p_{jl}^{(k)} \text{ – площадь этого треугольника, } m_j^{(k)} \text{ – число треугольников, полученных при триангуляции } j\text{-го многоугольника, } P_j^{(k)} \text{ – площадь всего } j\text{-го многоугольника.}$$

Таким образом, из множества эталонных скейлограмм  $S$  выбирается класс скейлограмм

$S_I(z)$ , наиболее близких к исследуемой скейлограмме  $s_0$  по критерию (19).

На втором этапе производится сопоставление исследуемой скейлограммы с изображениями эталонных скейлограмм  $S_I(z)$  по всей совокупности контурных границ перепадов яркости. При этом считаем, что пиксельные изображения контурных областей перепадов яркости исследуемой скейлограммы  $s_0$  и эталонных скейлограмм  $S_k^I(z) \in S_I(z)$  аппроксимированы множествами клеток  $G_{0r}$  и  $G_{kr}^I$ , ( $r = \overline{1, M_0}$ ), аналогично тому, как это показано на рис. 2. В качестве функции сходства  $O_{II}(s_0, S_k^I(z))$  воспользуемся общей формулой, объединяющей в непрерывный континуум большую часть известных коэффициентов сходства [4]

$$O_{II}(s_0, S_k^I(z)) = \sum_{r=1}^{M_0} \frac{1}{2} [K_r^{(\eta, \tau)}(G_{0r}; G_{kr}^I) + K_r^{(\eta, \tau)}(G_{kr}^I; G_{0r})]^\eta, \quad (20)$$

где  $K_r^{(\eta, \tau)}(G_{0r}; G_{kr}^I) = \frac{K_0(G_{0r}; G_{kr}^I)}{1 + \tau - \tau K_0(G_{0r}; G_{kr}^I)}$ ,

$K_r^{(\eta, \tau)}(G_{kr}^I; G_{0r}) = \frac{K_0(G_{kr}^I; G_{0r})}{1 + \tau - \tau K_0(G_{kr}^I; G_{0r})}$  – несим-

метричные меры, которые показывают степень сходства одного множества относительно другого; в свою очередь,

$$K_0(G_{0r}; G_{kr}^I) = \frac{n(G_{0r} \cap G_{kr}^I)}{n(G_{kr}^I)},$$

$$K_0(G_{kr}^I; G_{0r}) = \frac{n(G_{kr}^I \cap G_{0r})}{n(G_{0r})} \quad \text{– относительные}$$

направленные меры конвергенции;  $n(G_{0r})$ ,  $n(G_{kr}^I)$  – мощность (число элементов) соответствующих множеств.

В зависимости от того, какие значения принимают параметры  $-1 < \tau < \infty$ ,  $-\infty < \eta < \infty$ , коэффициенты схожести в (20) приобретают следующий вид: при  $[\tau, \eta] = [1, -1]$  – это коэффициент Жаккара; при  $[\tau, \eta] = [0, -1]$  – коэффициент Серенсена; при  $[\tau, \eta] = [0, 1]$  – коэффициент Кульчинского; при  $[\tau, \eta] = [0, \infty]$  – коэффициент Шимкевича–Симпсона;  $[\tau, \eta] = [0, -\infty]$  – коэффициент Браун–Бланке. Таким образом, вариация указанных параметров позволяет учесть все возможные нюансы, отражающие степень бли-

зости исследуемой скейлограммы к соответствующей эталонной скейлограмме.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный анализ условий, в которых эксплуатируются объекты авиационной техники, позволил сделать вывод о том, что фактическое техническое состояние авиационного двигателя определяется многомодовой динамикой деградационных процессов. Такой характер действующих на двигатель внешних факторов приводит к тому, что при одной и той же наработке или длительности эксплуатации двигателя имеют различное фактическое техническое состояние.

В связи с тем, что процессы, протекающие в авиационных двигателях, носят существенно нестационарный характер, для предварительной обработки сигналов датчиков предложено использовать вейвлет-преобразование, позволяющее проводить анализ и в частотной, и во временной области. Однако результаты вейвлет-преобразования, представленные как в виде трехмерного графика, так и в виде его двумерной проекции, требуют такого аналитического описания топологии, которое позволяет выделить наиболее существенные элементы и исключить избыточную информацию. С этой целью в статье излагается методика предварительной обработки экспериментальных данных с использованием процедуры аппроксимации контурных границ скейлограмм контролируемых параметров. Для того чтобы избежать субъективных оценок при выделении резких перепадов яркости на реальных полутоновых изображениях, в предложенной методике используется преобразование Хьюккеля, позволяющее в рамках решения оптимизационной задачи не только найти границу зон, но и рассчитать перепад яркости, аппроксимирующий реальное изображение. В статье проводится детальное исследование процедуры построения контурных границ в виде совокупности отдельных отрезков, включая важный вопрос сопряжения этих отрезков для получения непрерывного замкнутого контура. С этой целью предлагается оригинальный метод, суть которого заключается в том, чтобы отрезки, разделяющие зоны с различной яркостью, пересекались, причем точка пересечения лежала в области, ограниченной двумя смежными окнами. В результате удалось формализовать процедуру построения контурных границ в виде двух взаимосвязанных операций: операции направленного выхода в зону предполагаемого перепада яркости и операции последовательного размещения

круглых окон, обеспечивающих выполнение условий сопряжения смежных отрезков.

Разработанное аналитическое описание топологии скейлограмм позволило полностью автоматизировать процедуру оценки фактического технического состояния авиационного двигателя. Процедура оценки предусматривает распознавание объектов на контурных изображениях с использованием принципа «накопления гипотез». Процесс распознавания включает два этапа. На первом этапе выполняется ранжирование множества эталонных скейлограмм, имеющих одинаковое количество идентификационных признаков с исследуемой скейлограммой. Ранжирование производится в соответствии с критерием, оценивающим совпадение контурных границ перепадов яркости и величин таких перепадов в эталонной и исследуемой скейлограммах. На втором этапе производится сопоставление исследуемой скейлограммы с изображениями эталонных скейлограмм по всей совокупности контурных границ перепадов яркости. При этом в качестве функции сходства используется показатель, объединяющей в непрерывный континуум большую часть известных коэффициентов сходства, что позволяет идентифицировать большинство видов возможных дефектов авиационных двигателей, а также оценивать степень их развития.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульга В.И. Алгоритм обнаружения, определения положения и ориентации плоских объектов произвольной формы. Киев. 1984. 30 с. [ V. I. Shul'ga, *The detection algorithm to determine the position and orientation of flat objects of arbitrary shape*, (in Russian). Kiev, 1984. ]
2. Ефанов В. Н., Китабов А. Н. Вибрационная диагностика погружного электрооборудования с применением аппарата непрерывного вейвлет-преобразования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 6. С. 56-62. [ V. N. Efanov, A. N. Kitabov, "Vibration diagnostics of electrical submersible using the apparatus of the continuous wavelet transform," (in Russian), *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, no. 6, pp. 53-62, 2013. ]
3. Hueckel M., An Operator which Locates Edges in Digitized Pictures. Stanford University, 1971. CM, 18, No. 1. P. 113-125. [M. Hueckel, "An Operator which Locates Edges in Digitized Pictures", Stanford University, CM, 18, no. 1, pp. 113-125, 1971. ]
4. Сёмкин Б. И., Горшков М. В. Система аксиом симметричных функций двух переменных и меры, измеряющие отношения сходства различия, совместимости и зависимости для компонентов биоразнообразия // Вестник ТГЭУ. 2008. № 4. С. 31-46. [ B. I. Sjomkin, M. V. Gorshkov, "The system of axioms symmetric functions of two variables and measures, which measures the relationship of similarity differences, compatibility and the time dependence of the components of biodiversity," (in Russian), *Vestnik TGJeU*, no. 4, pp. 31-46, 2008. ]

## ОБ АВТОРАХ

**ЕФАНОВ Владимир Николаевич**, проф. каф. электроники и биомедицинских технологий. Дипл. инж.-э/техн. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по упр. в техн. системах (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. интел. комплексов борт. оборудования.

**ПЕТУХОВ Александр Викторович**, асп. каф. электроники и биомедицинских технологий. Дипл. инж. по авиац. приборам и изм.-выч. комплексам (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. интел. комплексов борт. оборудования.

## METADATA

**Title:** Assessment of the actual technical condition of aircraft engine using the principle of "accumulation hypotheses".

**Authors:** V. N. Efanov, A. V. Petuhov.

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** efanov@mail.rb.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 142-152, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The problem of evaluation of the actual technical condition of the aircraft engine. Assessment provides a comparison of operating parameters and their permissible values. For the analysis of nonstationary operating parameters, use the wavelet transform. As diagnostic signs of possible defects is used topology scalogram. For analytical description of the topology is proposed method of approximation contour borders scalogramms with specified characteristics of brightness of the image. The solution of the tasks of presentation outline borders as the aggregate of the individual segments is based on the transformation of Hueckel. To obtain a continuous closed loop developed a method of "nested window". Recognition of objects on the contour images is carried out using the principle of "accumulation hypotheses". To reduce the dimension of a hierarchical approach that includes two stages accumulation of hypotheses.

**Key words:** aircraft engine; technical condition; scalogram; transformation of Hueckel; accumulation of hypotheses.

**About authors:**

**EFANOV, Vladimir Nikolaevich**, Prof., Dept. of Electronics and biomedical technologies. Dipl. Electronic Engineer (UAI, 1973). Ph. D., Control Systems, (UAI, 1977). D.Sc. (Full Doctor), Control in Technical Systems (USATU, 1995). Research in the area of avionics systems intellectualized.

**PETUHOV, Aleksandr Viktorovich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of electronics and biomedical technologies. Grad. eng. in aviation devices and measuring-computational complexes (USATU, 2010). Research in the field of intellectualized complexes of the onboard equipment.