

Методика антишумовой валидации сигналов в многоканальных данных газотурбинных двигателей

М.П. Азевич, А.А. Алетдинова

Аннотация — В статье предложена методика, позволяющая на основе многоканальных данных газотурбинного двигателя (ГТД) отделять устойчивые предаварийные изменения от случайного шума. Актуальность работы связана с особенностями эксплуатационной телеметрии ГТД: с изменением режимов, выбросами и естественным разбросом, из-за чего ранние признаки неисправности могут маскироваться шумовой активностью каналов. Методика строится на основе данных штатной работы в несколько этапов: сначала формируется эталонное описание штатной работы, затем для каждого сигнала оценивается отклонение от этого описания и проверяется, является ли оно устойчивым, а не случайным. После этого подтверждённые отклонения объединяются в предупреждающее событие на уровне агрегата. В рамках построения методики используются медианное сглаживание временных рядов, оценка разброса значений и первых разностей, проверка доли устойчиво отклоняющихся точек, медианного сдвига и отношения сигнал/шум. Апробация методики на эксплуатационных данных показала, что на всех данных штатной эксплуатации ложные агрегатные предупреждения отсутствуют, а в пяти из шести аварийных сценариев предупреждение формируется в интервале 4,3-9,1 ч до аварии: в сценарии «Коксование масла» предупреждающее событие уровня агрегата формируется за 8,7 ч до момента аварии, а в сценарии «Разрушение подшипника компрессора низкого давления (КНД)» за 7,5 ч. Полученные результаты показывают, что методика может использоваться как самостоятельный этап подготовки сигналов для диагностических и прогностических систем. В статье также обозначены направления дальнейшего развития методики.

Ключевые слова — антишумовая валидация, газотурбинный двигатель, многоканальная телеметрия, предвестники аварии, ранняя диагностика, штатная работа агрегата.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы мониторинга газотурбинных двигателей формируют многоканальные временные ряды, в которых одновременно присутствуют вибрационные каналы, частоты вращения роторов, температуры и давления тракта, параметры маслосистемы и топливной системы, приведённые термогазодинамические показатели, диагностические индексы и технологические параметры [1, 2, 3]. Для

эксплуатационной практики важно не только проводить мониторинг и фиксировать отклонения отдельных каналов, но и различать два уровня анализа: уровень отдельного сигнала, на котором подтверждается устойчивость изменения, и уровень агрегата, на котором согласованные отклонения нескольких сигналов превращаются в предупреждение [4, 5, 6].

Реальные эксплуатационные временные ряды при этом далеки от лабораторных условий. На технологические параметры накладываются режимные перестройки, одиночные выбросы, мелкие случайные колебания, пропуски и различия между сериями штатной работы разных агрегатов. По этой причине одно и то же пороговое правило может либо порождать ложные тревоги, либо скрывать ранние признаки неисправности за естественным разбросом значений сигналов.

Цель работы состоит в разработке и апробации методики антишумовой валидации сигналов газотурбинного двигателя, которая на уровне отдельного сигнала выделяет только устойчивые отклонения, а на уровне агрегата переводит согласованную совокупность таких отклонений в предупреждение.

II. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ И ИХ ОГРАНИЧЕНИЯ

Анализ опубликованных работ позволяет выделить четыре основные группы подходов. К первой относятся пороговые схемы и инженерные правила контроля отдельных параметров [7, 8, 9]. Ко второй относятся методы параметрической диагностики газодинамического тракта [10, 11]. Третью группу образуют подходы, основанные на вибрационных признаках и анализе спектров [12, 13, 14]. Четвёртая группа включает методы анализа данных, в том числе алгоритмы обнаружения аномалий и модели машинного обучения [15, 16, 17].

Несмотря на различие моделей, для реальной эксплуатационной телеметрии у этих подходов есть общие ограничения. Во-первых, нормальное состояние нередко оценивается по начальной части самой аварийной серии, что опасно при наличии скрытой деградации. Во-вторых, решение часто принимается по отдельному каналу, хотя развитие неисправности обычно проявляется как согласованное изменение нескольких

Статья получена 2 мая 2026 г.
Азевич Марк Павлович, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Россия (e-mail: azevmark@yandex.ru).

Алетдинова Анна Александровна, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Россия (e-mail: aletdinova@asugubkin.ru).

групп сигналов. В-третьих, часто не разделяются этап подтверждения сигнала и этап формирования эксплуатационного предупреждения, из-за чего кратковременные всплески и устойчивые изменения интерпретируются одинаково.

Именно эти ограничения показывают необходимость создания данной методики.

III. СИГНАЛЬНОЕ ПРОСТРАНСТВО НАБЛЮДЕНИЯ

Для построения методики важна не столько количество записей, сколько состав самих сигналов. Наблюдаемое пространство сигналов объединяет несколько физических групп: основные параметры двигателя, вибрационные гармоники, диагностические индексы, приведённые параметры и каналы масло- и топливной системы. Такая структура определяет и содержание будущей методики: часть сигналов отражает состояние проточной части, часть – вибрационное поведение роторов и опор, часть – вторичные диагностические индексы.

Таблица 1 показывает, какие группы сигналов доступны для последующего построения методики.

Таблица 1 – Состав многоканального пространства сигналов

Семейство сигналов	Префикс	Число каналов	Примеры
Основные параметры	G1	12	Частота вращения ротора низкого давления; Частота вращения ротора высокого давления;
Вибрационные сигналы	G2	29	2-я гармоника ротора низкого давления; 2-я гармоника ротора высокого давления;
Диагностические индексы	G3	21	Диагностика передней опоры КНД
Приведённые параметры	G4	8	Приведённая частота вращения ротора низкого давления; Приведённая частота вращения ротора высокого давления
Параметры масло- и топливной системы	TC	8	Давление масла в магистрали общей откачки; Давление масла в нагнетающей магистрали;
Технологические параметры	PROCESS	39	Режим работы АВОМД; Положение байпасного клапана BOY 2

Таким образом, исходя из разнообразия семейств сигналов, методика должна работать в двух измерениях одновременно: требуется оценивать устойчивость изменения в пределах отдельного канала и согласованность между разными группами сигналов. Без такого разделения анализ сводится к обработке

отдельных всплесков и не позволяет перейти к эксплуатационно-значимому предупреждению.

IV. МЕТОДИКА АНТИШУМОВОЙ ВАЛИДАЦИИ СИГНАЛОВ

Предлагаемая методика строится как последовательность взаимосвязанных этапов. Сначала в многоканальном ряде сигналов подтверждаются устойчивые изменения на уровне отдельного канала, а затем эти подтверждённые изменения объединяются в предупреждающее событие на уровне агрегата.

Принципиально важно, что численные параметры методики не фиксируются заранее как универсальные. Они подбираются на этапе настройки по данным штатной эксплуатации конкретного объекта, после чего используются без перенастройки при апробации на аварийных сценариях. Сводная последовательность этапов приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Основные этапы методики антишумовой валидации сигналов

Этап	Содержание	Назначение
Подавление одиночных выбросов	Медианное сглаживание исходного ряда и переход к сглаженному представлению сигнала	Снижение влияния единичных выбросов при сохранении длительных смещений уровня
Построение внешней эталонной нормы	Расчёт эталонного уровня, разброса значений, разброса первой разности и нормального диапазона по штатной работе	Формирование независимого описания нормального поведения канала
Приведение эталонной нормы к текущему режиму	Оценка устойчивого базового интервала и перенос эталонного уровня в режим анализируемой серии	Компенсация режимного смещения без подмены внешней нормы локальной статистикой аварийного ряда
Расчёт индивидуально-го критерия отклонения	Оценка отклонения сигнала относительно перенесённой эталонной нормы с учётом естественного разброса и первой разности	Отделение значимого смещения от широкого, но стационарного разброса признака
Подтверждение устойчивого изменения	Проверка доли точек за порогом, согласованности направления, медианного сдвига и отношения сигнал/шум	Отсев кратковременных всплесков и фиксация только устойчивых изменений

Таблица 2 задаёт верхнеуровневую схему методики. Далее каждый этап раскрывается математически и содержательно.

A. Подавление одиночных выбросов

На первом этапе исходный временной ряд j -го канала заменяется медианно сглаженным рядом. Для этого используется симметричное интервал фиксированной длины, которое подавляет одиночные выбросы, но сохраняет длительные смещения уровня:

$$\tilde{x}_j(t) = \text{median}(x_j(t-h), \dots, x_j(t+h)), \quad (1)$$

где $x_j(t)$ – исходное значение сигнала j -го канала в момент;

$\tilde{x}_j(t)$ – медианно сглаженное значение сигнала j -го

канала в момент времени t ;

h – полуразмер интервала сглаживания.

Медианный оператор сохраняет длительные смещения уровня и одновременно подавляет влияние единичных экстремальных значений [18, 19].

В. Построение внешнего эталонного описания штатной работы

Для каждого канала формируется внешнее эталонное описание штатной работы по одной или нескольким сериям штатной эксплуатации. Приоритет выбора эталона задаётся иерархически: сначала используется агрегат, затем агрегат той же станции, а при отсутствии таких данных – общий пул штатной эксплуатации:

$$m_j^N = \text{median}(N_j), \quad (2)$$

$$s_j^N = 1.4826 \cdot \text{median}\left\{\left|x^{\sim} - m_j^N\right| : x^{\sim} \in N_j\right\}, \quad (3)$$

$$s_{\Delta j}^N = \frac{1.4826 \cdot \text{median}\left\{\left|\Delta x^{\sim} - \text{median}(\Delta N_j)\right| : \Delta x^{\sim} \in \Delta N_j\right\}}{\sqrt{2}}, \quad (4)$$

$$R_j^N = q_{0.95}(N_j) - q_{0.05}(N_j), \quad (5)$$

где m_j^N – медианная оценка эталонного уровня j -го канала по данным штатной работы;

s_j^N – оценка разброса значений сигнала j -го канала на эталонной выборке;

$s_{\Delta j}^N$ – оценка разброса первой разности сигнала j -го канала на эталонной выборке;

R_j^N – нормальный диапазон изменения сигнала j -го канала на эталонной выборке;

N_j – эталонная выборка значений сигнала j -го канала, сформированная по штатной работе;

ΔN_j – эталонная выборка первых разностей сигнала j -го канала;

$q_{0.95}$ – 95-й квантиль соответствующей выборки;

$q_{0.05}$ – 5-й квантиль соответствующей выборки;

$x^{\sim}$ – элемент эталонной выборки сглаженных значений сигнала j -го канала;

$\Delta x^{\sim}$ – элемент эталонной выборки первых разностей сглаженного сигнала j -го канала.

Коэффициент 1,4826 в формулах (3) и (4) переводит медианное абсолютное отклонение к шкале, сопоставимой со стандартным отклонением при близком к нормальному распределению шума. Деление на $\sqrt{2}$ в формуле (4) используется для пересчёта масштаба первых разностей к масштабу исходного шума при предположении независимых соседних шумовых составляющих. Использование внешней эталонной нормы устраняет зависимость от потенциально деградирующей начальной части аварийной серии.

С. Приведение внешнего эталонного описания к текущему рабочему режиму агрегата

Даже при наличии внешнего эталонного описания прямое сравнение абсолютных значений может быть некорректным из-за различий в рабочем режиме агрегата. Поэтому в начальной части анализируемого ряда сигналов выделяется устойчивый базовый интервал,

который используется не для оценки нового эталона, а только для переноса эталонного уровня в текущий рабочий режим:

$$B_j = \text{argmin}\left\{\text{std}\left\{x^{\sim}_j(t) : t \in W\right\} : |W| = L_{\text{base}}\right\}, \quad (6)$$

$$\delta_j = \text{median}\left\{x^{\sim}_j(t) : t \in B_j\right\} - m_j^N, \quad (7)$$

$$m_j^* = m_j^N + \delta_j, \quad (8)$$

где B_j – базовый интервал для j -го канала;

W – скользящий интервал фиксированной длины в начальном фрагменте анализируемого ряда сигналов, рассматриваемый при поиске базового интервала;

δ_j – сдвиг эталонного уровня к текущему рабочему режиму;

m_j^* – эталонный уровень, перенесённый в текущий рабочий режим;

L_{base} – длина базового интервала, используемого для переноса эталонного уровня;

$x^{\sim}_j(t)$ – сглаженное значение сигнала j -го канала.

Формулы (6)-(8) показывают, что базовый интервал используется только для приведения внешнего эталонного описания к текущему рабочему режиму. При этом сама эталонная статистика по-прежнему определяется только по данным штатной работы. Тем самым базовый интервал компенсирует режимное смещение, но не подменяет внешний эталон статистикой из аварийной серии.

Д. Расчет индивидуального критерия отклонения сигнала

После переноса эталона для каждого канала строится индивидуальный критерий отклонения. Он должен реагировать на устойчивый выход из нормального состояния, но не считать опасным канал, который сам по себе обладает широким, однако стационарным разбросом значений сигнала:

$$T_j = 3 \cdot \max\left(s_j^N, w_{\text{diff}} \cdot s_{\Delta j}^N, 0.08 \cdot R_j^N\right), \quad (9)$$

$$d_j(t) = \tilde{x}_j(t) - m_j^*, \quad (10)$$

где T_j – индивидуальный порог отклонения для j -го канала;

$d_j(t)$ – отклонение сигнала от перенесённого в текущий рабочий режим эталонного уровня;

$\tilde{x}_j(t)$ – текущее значение сигнала j -го канала в момент времени t ;

m_j^* – эталонный уровень, перенесённый в текущий рабочий режим;

s_j^N – эталонная оценка разброса значений сигнала j -го канала;

$s_{\Delta j}^N$ – эталонная оценка разброса первой разности сигнала j -го канала;

R_j^N – нормальный диапазон изменения сигнала j -го канала на эталонной выборке;

w_{diff} – коэффициент учёта разброса первой разности.

Формулы (9) и (10) задают вычислительный шаблон индивидуального критерия. В нём учитываются разброс

сигнала штатной работы, вклад первой разности и минимальная доля нормального диапазона. Коэффициент 3,0 задаёт требуемую кратность порога относительно шумовой шкалы, коэффициент 0,08 задаёт минимальную долю нормального диапазона, а коэффициент учёта разброса первой разности задаёт вклад локального шума.

Таким образом, первый коэффициент отвечает за чувствительность к устойчивому смещению уровня, второй – не позволяет занижать порог по отношению к нормальному диапазону сигнала, а коэффициент учёта разброса первой разности задаёт вклад локального шума в итоговый порог отклонения. Принцип работы этого критерия показан на рисунке 1.

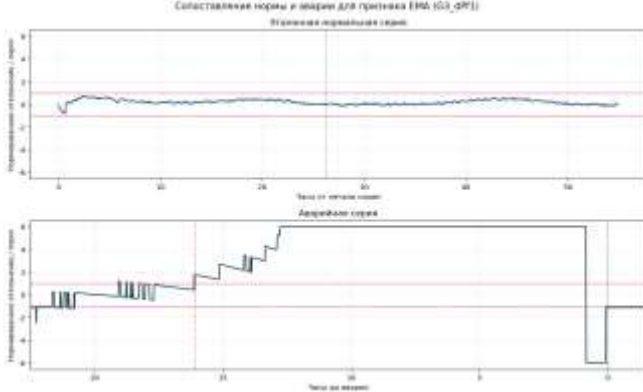


Рисунок 1 – Сопоставление штатной и аварийной динамики сигнала относительно внешнего эталонного описания штатной работы

Рис. 1 иллюстрирует принцип критерия: сравнение выполняется не по абсолютным значениям двух рядов, а по нормированной шкале отклонения от внешнего эталонного описания штатной работы. При таком сопоставлении штатной и аварийной динамики сигнала, видно, что аварийная серия переходит в новое устойчивое состояние, тогда как штатная серия сохраняет колебания в допустимых пределах.

Е. Подтверждение устойчивого изменения

Сам факт длительного выхода за индивидуальный порог ещё не означает наличия устойчивого предаварийного изменения. Поэтому для каждого предполагаемого момента изменения рассматриваются интервал до этого момента и интервал после него. На этих интервалах рассчитываются доля точек, сохраняющих отклонение, согласованность направления изменения, медианный сдвиг и отношение сигнал/шум:

$$A_j(t_0) = \text{mean} \{ I(|d_j(t)| \geq T_j) : t \in W_{\text{post}} \}, \quad (11)$$

$$S_j(t_0) = \max \left(\text{mean} \{ I(d_j(t) \geq T_j) : t \in W_{\text{post}} \}, \right. \\ \left. \text{mean} \{ I(d_j(t) \leq -T_j) : t \in W_{\text{post}} \} \right), \quad (12)$$

$$C_j(t_0) = \left| \text{median} \{ d_j(t) : t \in W_{\text{post}} \} - \right. \\ \left. - \text{median} \{ d_j(t) : t \in W_{\text{pre}} \} \right|, \quad (13)$$

$$E_j(t_0) = \frac{\left| \text{median} \{ d_j(t) : t \in W_{\text{post}} \} \right|}{\max(s_j^N, w_{\text{diff}} \cdot s_{\Delta j}^N, s_{\text{post}}, w_{\text{diff}} \cdot s_{\Delta \text{pre}}, w_{\text{diff}} \cdot s_{\Delta \text{post}}, T_j / 3, \varepsilon)}, \quad (14)$$

где $A_j(t_0)$ – доля точек, остающихся за индивидуальным порогом после предполагаемого момента изменения;

$S_j(t_0)$ – согласованность направления отклонения после предполагаемого момента изменения;

$C_j(t_0)$ – разность медианных уровней до и после предполагаемого момента изменения;

$E_j(t_0)$ – отношение медианного смещения к локальной шумовой шкале;

t_0 – рассматриваемый момент возможного начала устойчивого изменения;

W_{pre} – окно наблюдения до момента t_0 ;

W_{post} – окно наблюдения после момента t_0 ;

$I(\cdot)$ – индикаторная функция, принимающая значение 1 при выполнении условия и 0 в противном случае;

s_{post} – локальная оценка разброса сигнала на интервале после момента t_0 ;

$s_{\Delta \text{pre}}$ – локальная оценка разброса первой разности сигнала на интервале до момента t_0 ;

$s_{\Delta \text{post}}$ – локальная оценка разброса первой разности сигнала на интервале после момента t_0 ;

ε – малый положительный параметр, исключающий деление на ноль.

В формулах (13) и (14) медиана берётся не от интервала как множества индексов, а от значений отклонения $d_j(t)$ на соответствующем интервале наблюдений.

Формулы (11)-(14) вычисляются для одного и того же предполагаемого момента изменения и совместно описывают устойчивость наблюдаемого отклонения.

Окончательное подтверждение сигнала отдельного канала выполняется только при одновременном выполнении системы ограничений:

В формулах (15)-(18) для краткости используются обозначения без аргумента: A_j , S_j , C_j и E_j означают значения $A_j(t_0)$, $S_j(t_0)$, $C_j(t_0)$ и $E_j(t_0)$, вычисленные для рассматриваемого момента t_0 . Сигнал подтверждается в первом по времени моменте t_0 , для которого одновременно выполняются все ограничения.

$$A_j \geq 0.75, \quad (15)$$

$$S_j \geq 0.75, \quad (16)$$

$$C_j \geq \max \left(2 \cdot \max(s_j^N, w_{\text{diff}} \cdot s_{\Delta j}^N), |0.10 \cdot R_j^N|, T_j / 2 \right), \quad (17)$$

$$E_j \geq 3.80, \quad (18)$$

где A_j – условие минимальной доли точек, устойчиво остающихся за порогом;

S_j – условие согласованности направления отклонения;

C_j – условие минимального медианного сдвига;

E_j – условие минимального отношения сигнал/шум.

Формулы (15)-(18) задают систему ограничений для подтверждения сигнала. Значения 0,75 задают требуемую долю согласованных точек и направлений, коэффициент 2 в формуле (17) задаёт минимальную

кратность медианного сдвига по отношению к эталонному разбросу, коэффициент 0,10 связывает требуемый сдвиг с нормальным диапазоном сигнала, а значение 3,80 в формуле (18) задаёт минимально допустимое отношение сигнал/шум. Конкретные численные значения этих ограничений подбираются на этапе настройки по данным штатной работы.

Указанные коэффициенты выполняют разные функции. Значение порога 0,75 отвечает за требуемую устойчивость поведения после предполагаемого момента изменения (16), коэффициент 2 отсекает слишком малые медианные сдвиги (17), коэффициент 0,10 не позволяет подтверждать изменение, которое мало относительно нормального диапазона канала (17), а порог 3,80 задаёт минимальный запас по отношению сигнал/шум (18).

F. Формирование предупреждающего события на уровне агрегата

После подтверждения отдельных сигналов строится интегральный индекс, отражающий общую интенсивность наиболее активных сигналов. Он используется для автоматического определения момента аварии и для последующего анализа времени предупреждения:

$$r_j(t) = d_j(t) / T_j, \quad (19)$$

$$B(t) = \text{median_rolling}(\text{mean_top} - k \{r_j(t)\}), \quad (20)$$

где $r_j(t)$ – нормированная интенсивность j -го сигнала в момент времени t ;

$B(t)$ – интегральный индекс коллективного изменения;

k – число наиболее активных сигналов, участвующих в расчёте интегрального индекса;

$\text{mean_top} - k$ – оператор усреднения k наибольших значений $r_j(t)$ среди всех сигналов в момент времени t ;

median_rolling – оператор скользящей медианы, применяемый к интегральному индексу;

L_B – длина окна скользящей медианы для сглаживания интегрального индекса.

По формулам (19) и (20) оценивается интегральная интенсивность группового изменения, после чего подтверждённые сигналы объединяются во временные группы. Предупреждающее событие формируется только при выполнении дополнительных инженерных ограничений: изменение должно быть достаточно компактным по времени и физически содержательным по составу сигналов. В частности, слабая комбинация одного вибрационного и одного базового параметра не считается достаточным основанием для предупреждения, а чрезмерно растянутые по времени кластеры отсеиваются как нехарактерные для развивающейся неисправности. Такой переход от отдельных сигналов к предупреждающему событию приближает итоговое решение к логике реального эксплуатационного мониторинга.

Параметр k в формуле (20) задаёт число наиболее активных сигналов, участвующих в построении интегрального индекса коллективного изменения. Длина окна L_B определяет сглаживание этого индекса во

времени. Оба параметра подбираются на этапе настройки по данным штатной работы.

Настройка численных параметров выполняется по данным штатной работы в соответствии с процедурой, приведённой в подразделе V.A.

V. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ

A. Данные для настройки и апробации

После построения методика апробирована на реальных данных эксплуатационной телеметрии. Сначала параметры алгоритма настраивались по двум сериям штатной работы, а затем, без дополнительной перенастройки под конкретные аварии, схема применялась к шести аварийным сценариям. Контуры данных для настройки и апробации приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Контуры данных для настройки и апробации методики

Контур	Число серий	Суммарная длительность анализируемых фрагментов, ч	Назначение
Штатная работа	2	126,8	Калибровка эталонной нормы и подбор параметров методики по стабильным данным
Аварийные сценарии	6	134,5	Проверка времени предупреждения и полноты охвата аварийных ситуаций

Под суммарной длительностью анализируемых фрагментов понимается количество минут наблюдения после дедупликации временных меток, переведённое в часы. Эта величина характеризует реальный объём телеметрии, по которому принималось решение, и не совпадает с календарной протяжённостью между первым и последним штампом времени.

Численные параметры методики определялись по двум независимым записям штатной работы. Настройка проводилась в два прохода: в первом одна запись использовалась для построения эталонного описания сигналов, а вторая — для контроля полученной конфигурации; во втором проходе записи менялись местами. Для каждого набора параметров в обоих проходах подсчитывались число предупреждений на уровне агрегата и плотность подтверждённых отклонений отдельных сигналов, выраженная числом отклонений на 100 каналов-часов. Набор параметров признавался допустимым, если ни в одном из двух контрольных проходов не возникало предупреждения уровня агрегата.

Проверялись базовые интервалы длительностью 120, 180 и 240 мин, окна медианного сглаживания на 7 и 11 отсчётов, минимальная длительность устойчивого выхода 15, 20 и 25 мин, пороги отношения сигнал/шум 3,20; 3,50; 3,80 и 4,00, а также коэффициенты учёта первых разностей 0; 1,0 и 1,5. Значение 0,75 в формулах (15) и (16) задаёт единое структурное требование: не менее трёх четвертей отсчётов после предполагаемого

изменения должны находиться за индивидуальным порогом и сохранять одно направление отклонения. Из допустимых наборов выбирался вариант с меньшей плотностью подтверждённых отклонений; при близких результатах предпочтение отдавалось меньшей требуемой предыстории и меньшей задержке подтверждения. Порог 3,80 соответствовал точке замедления улучшения: его увеличение с 3,50 до 3,80 уменьшило число подтверждённых отклонений на штатных данных с 31 до 28, тогда как дальнейшее увеличение до 4,00 — только с 28 до 27. Увеличение базового интервала со 120 до 180 и 240 мин уменьшало это число соответственно до 25 и 24, но требовало дополнительно 60 и 120 мин непрерывной предыстории. Поэтому для итоговой конфигурации принят базовый интервал 120 мин, порог отношения сигнал/шум 3,80, медианное сглаживание на 7 отсчётах, минимальная длительность устойчивого выхода 20 мин и коэффициент учёта первых разностей 1,5. Эта конфигурация дала 28 подтверждённых отклонений на 5651,4 канала-часа, то есть 0,50 на 100 канала-часов, и ни одного предупреждения уровня агрегата за 126,8 ч штатной работы. После завершения настройки значения параметров фиксировались, а затем применялись к шести аварийным сценариям.

В. Результаты на уровне отдельных сигналов

Первый этап апробации показывает, насколько антишумовая валидация сокращает число недостоверных срабатываний отдельных каналов. В качестве меры используется число срабатываний на 100 ч наблюдения, просуммированного по всем анализируемым сигналам. Сводные результаты этого уровня приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты валидации на уровне отдельных сигналов

Контур	Суммарная длительность наблюдения по всем сигналам, ч	Сырые	Подтвержденные	Сырые / 100 ч	Подтв. / 100 ч
Аварийные серии	4504,0	163	41	3,62	0,91
Нормальная работа	5651,4	67	28	1,19	0,50

Как видно из таблицы IV, из 163 сырых срабатываний в аварийных сериях после антишумовой проверки сохраняется 41 подтверждённый сигнал. На штатной работе после той же процедуры сохраняются 28 подтверждённых сигналов, или 0,50 на 100 ч наблюдения по всем сигналам. Следовательно, результат на уровне отдельного канала ещё не может рассматриваться как эксплуатационное предупреждение и требует последующего объединения сигналов по физическому и временному принципу.

С. Результаты на уровне предупреждающего события

Для эксплуатационного применения отдельный подтверждённый канал ещё не должен считаться тревогой. Поэтому следующим этапом была оценена

работа механизма формирования предупреждающего события, который объединяет подтверждённые сигналы в групповое решение на уровне агрегата. Сводные результаты этого уровня приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты формирования предупреждающих событий

Контур	Серий	Суммарная длительность рядов, ч	Всего предупреждающих событий	Серий с предупреждением	Событий / 100 ч
Аварийные серии	6	134,5	6	5	4,46
Нормальная работа	2	126,8	0	0	0,00

Таблица 5 показывает, что после перехода к предупреждающему событию на 126,8 ч штатной эксплуатации ложные агрегатные предупреждения отсутствуют. При этом предупреждение формируется заранее в 5 из 6 аварийных сценариев. Всего выделено 6 предупреждающих событий, поскольку в одном сценарии наблюдаются две разнесённые во времени группы подтверждённых сигналов.

Д. Примеры реализации работы методики на аварийных сценариях

Сводка по времени появления первого подтверждённого сигнала и первого предупреждающего события приведена в таблице 6.

Таблица 6 – Первые подтвержденные сигналы и предупреждающие события в рамках аварийных сценариях

Сценарий	Часы до аварии для первого сигнала	Предупреждающее событие	Часы до аварии для первого предупреждения	Основание предупреждения
Сценарий 1. Замерзание конденсата в канале Р2	8,7	Нет	—	Предупреждающее событие не сформировано
Сценарий 2. Коксование масла	13,5	Да	8,7	Согласованное изменение нескольких семейств
Сценарий 3. Разрушение КПА	16,1	Да	4,7	Согласованное изменение нескольких семейств
Сценарий 4. Разрушение подшипника КВД	4,3	Да	4,3	Согласованное изменение нескольких семейств
Сценарий 5. Разрушение подшипника КНД	7,5	Да	7,5	Выраженный пакет вибрационных признаков
Сценарий 6. Трещина на сепараторе переднего подшипника КВД	13,2	Да	9,1	Согласованное изменение нескольких семейств

Как видно из таблицы 6: первые подтверждённые сигналы отдельных каналов возникают в интервале 4,3–16,1 ч до аварии, тогда как предупреждающее событие на уровне агрегата формируется в 5 из 6 сценариев в

интервале 4,3-9,1 ч до аварии.

Для физической интерпретации результатов таблицы 6 учитывались прежде всего первичные измерительные каналы с однозначным инженерным смыслом; вторичные диагностические индексы рассматривались только как дополнительное подтверждение.

При замерзании конденсата устойчиво изменилось только отклонение приведённого давления за компрессором высокого давления от исходного уровня, то есть одна группа приведённых параметров. Межгруппового подтверждения не возникло, поэтому предупреждение не сформировалось.

При коксовании масла ранняя вибрационная группа включала гармонику вращения рессоры привода КПА и первую гармонику ротора силовой турбины; дополнительное подтверждение обеспечила группа диагностических индексов. Ближе к аварии изменились температура масла в магистрали подачи и давление масла в магистрали общей откачки. Наблюдаемая последовательность соответствует переходу от локального вибрационного изменения к более широкой реакции масляных и режимных параметров.

При разрушении КПА предупреждение сформировала согласованная реакция второй гармоники ротора силовой турбины, общей виброскорости корпуса силовой турбины, температуры масла в магистрали общей откачки и температуры масла за откачивающим насосом опоры вентилятора. Таким образом, в данном случае одновременно проявились вибрационная, масляная и температурная составляющие процесса.

При разрушении подшипника КВД наиболее однозначным физическим изменением стало снижение температуры масла в магистрали подачи в двигатель; его дополнил вторичный диагностический канал масляной системы, поэтому в решении участвовали группы параметров масла и диагностики.

При разрушении подшипника КНД сформировался компактный пакет вибрационных составляющих: первая гармоника ротора высокого давления, третья гармоника ротора низкого давления, гармоника вращения тел качения подшипника задней опоры КНД и вторая гармоника ротора силовой турбины. Согласованность четырёх вибрационных каналов позволила сформировать предупреждение без привлечения других групп.

При трещине на сепараторе переднего подшипника КВД первыми физически интерпретируемыми каналами предупреждающей группы стали третья и вторая гармоники ротора высокого давления; затем изменение подтвердилось группой вторичной диагностики. Такая картина указывает не на одиночный выброс, а на согласованное изменение нескольких гармоник одного ротора с независимым диагностическим подтверждением.

Наиболее показательным является сценарий коксования масла. Здесь первые подтверждённые сигналы появляются существенно раньше агрегатного предупреждения, однако только после появления согласованной картины по вибрационным и диагностическим каналам формируется предупреждение на уровне агрегата. Этот переход показан на рисунке 2.

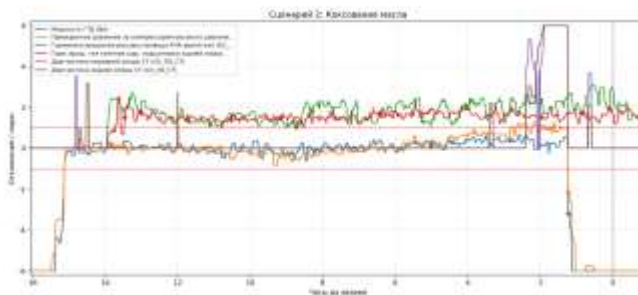


Рисунок 2 – Пример развития подтверждающих сигналов при сценарии коксования масла

В сценарии разрушения КПА методика выявляет согласованный рост вибрационных и температурных сигналов, который переходит в устойчивое предаварийное состояние за несколько часов до аварии (рисунок 3).

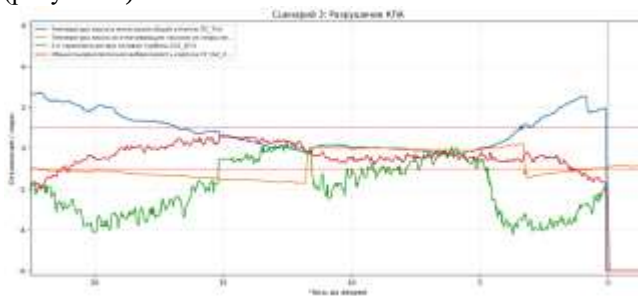


Рисунок 3 – Пример согласованного изменения вибрационных и температурных сигналов при сценарии разрушения КПА

На рисунке 4 сопоставлена динамика интегрального индекса $B(t)$ для разрушения подшипника КНД, где предупреждение сформировано за 7,5 ч до аварии, и замерзания конденсата в канале P2, где предупреждение отсутствует.

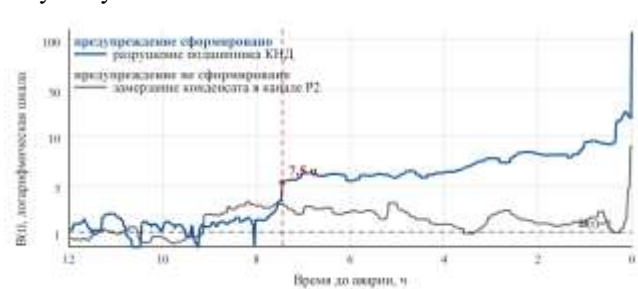


Рисунок 4 – Динамика интегрального индекса $B(t)$ для сценариев с предупреждением и без него

VI. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты подтверждают, что основная задача исследования решается именно за счёт последовательного разделения двух этапов. На первом этапе выделяются подтверждённые сигналы отдельных каналов, а на втором – формируется предупреждающее событие на уровне агрегата. Если ограничиться только первым этапом, то при штатной работе сохраняются отдельные подтверждённые сигналы. Однако после введения условий физической согласованности и временной компактности предупреждающие события на штатной работе исчезают.

С практической точки зрения важно различать два

результата. Первые подтверждённые сигналы отдельных каналов появляются за 4,3-16,1 ч до аварии, однако сами по себе они ещё не являются основанием для предупреждения. Эксплуатационно значимое предупреждающее событие формируется в 5 из 6 аварийных сценариев за 4,3-9,1 ч до аварии. Это означает, что методика не только уменьшает шумовую активность, но и сохраняет прикладную чувствительность к реальным аварийным процессам. Единственным неохваченным сценарием остаётся ситуация, в которой изменения сосредоточены главным образом в одной группе признаков и не получают достаточного межгруппового подтверждения.

Следует отметить, что объём штатной выборки остаётся ограниченным двумя сериями, поэтому полученный нулевой уровень ложных агрегатных предупреждений следует рассматривать как сильный, но предварительный результат. Для окончательной эксплуатационной оценки методика должна быть проверена на более длительных периодах штатной работы

VII. НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Дальнейшее развитие методики целесообразно вести по нескольким направлениям. Во-первых, перспективно использование более формализованных методов поиска точек изменения, в том числе последовательных статистических критериев и байесовского подхода. Во-вторых, полезно развитие методов учёта взаимосвязей между каналами, например графовых моделей зависимостей. В-третьих, представляется перспективным объединение предложенной антишумовой валидации с физическими моделями деградации и с методами прогноза остаточного ресурса. Наконец, отдельной задачей остаётся расширение штатной выборки и адаптация параметров методики к длительной многомесячной эксплуатации.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ существующих подходов показал необходимость создания методики, которая обладает следующими особенностями: не зависит от временных аномальных всплесков значений датчиков, является адаптируемой к индивидуальным параметрам работы конкретного агрегата и рассматривает аварийное состояние не по точечным характеристикам, а по совокупности разных семейств датчиков.

Исходя из этого, в работе предложена методика антишумовой валидации сигналов в многоканальной телеметрии газотурбинных двигателей, основанная на внешней эталонной норме, переносе нормы в текущий режим, индивидуальном критерии отклонения, подтверждении устойчивого изменения и формировании предупреждающего события на уровне агрегата.

Экспериментальная проверка показала, что после настройки по данным штатной работы методика сохраняет 41 подтверждённый сигнал из 163 сырых аварийных срабатываний. На уровне отдельных каналов первые подтверждённые сигналы появляются за 4,3-16,1 ч до аварии. После перехода к предупреждающему событию ложные агрегатные предупреждения на 126,8 ч

штатной эксплуатации отсутствуют, а предупреждение формируется в 5 из 6 аварийных сценариев за 4,3-9,1 ч до аварии.

Тем самым показано, что основная ценность предложенного подхода состоит не только в раннем обнаружении аварий, но и в построении воспроизводимой процедуры отделения значимых изменений от шумовой активности каналов.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483-1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- [2] 2. Tahan M., Tsoutsanis E., Muhammad M., Abdul Karim Z. A. Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: A review // *Applied Energy*. 2017. Vol. 198. P. 122-144. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.048.
- [3] 3. Hanachi H., Mechefske C., Liu J., Banerjee A., Chen Y. Performance-Based Gas Turbine Health Monitoring, Diagnostics, and Prognostics: A Survey // *IEEE Transactions on Reliability*. 2018. Vol. 67, No. 3. P. 1340-1363. DOI: 10.1109/TR.2018.2822702.
- [4] 4. Fentaye A. D., Baheta A. T., Gilani S. I. U. H., Kyrianiadis K. G. A Review on Gas Turbine Gas-Path Diagnostics: State-of-the-Art Methods, Challenges and Opportunities // *Aerospace*. 2019. Vol. 6, No. 7. Art. 83. DOI: 10.3390/aerospace6070083.
- [5] 5. ГОСТ Р ИСО 17359-2015. Контроль состояния и диагностирование машин. Общее руководство.
- [6] 6. ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Часть 1. Общее руководство.
- [7] 7. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы.
- [8] 8. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации.
- [9] 9. ГОСТ Р ИСО 13379-2-2016. Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Часть 2. Подход на основе данных.
- [10] 10. Перевошиков С. И. Методика параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов с турбоприводом // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2016. № 5(119). С. 101-108. DOI: 10.31660/0445-0108-2016-5-101-108.
- [11] 11. Семушкин А. В., Подлозный А. О., Черникова Е. А., Щуровский В. А. Методические принципы параметрической диагностики технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов // *Вести газовой науки*. 2017. № 1(29). С. 22-31.
- [12] 12. Байков И. П., Смородова О. В., Китаев С. В., Шаммазов А. М. Диагностирование состояния газоперекачивающих агрегатов специальными методами интерпретации спектров виброскорости // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 4. С. 59-67. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/196.
- [13] 13. Дедюхин А. С., Андреев К. Д. Диагностика неисправностей газотурбинных установок с применением вибродиагностики // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2021. Т. 5-1(56). С. 16-25. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-5-1-16-25.
- [14] 14. Chu T., Nguyen T., Yoo H., Wang J. A review of vibration analysis and its applications // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 5. Art. e26282. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26282.
- [15] 15. Basseville M., Nikiforov I. V. Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [16] 16. Miao D., Feng K., Xiao Y., Li Z., Gao J. Gas Turbine Anomaly Detection under Time-Varying Operation Conditions Based on Spectra Alignment and Self-Adaptive Normalization // *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 3. Art. 941. DOI: 10.3390/s24030941.
- [17] 17. Fahmi A.-T. W. K., Kashyzadeh K. R., Ghorbani S., Jawad J. Advancements in Gas Turbine Fault Detection: A Machine Learning Approach Based on the Temporal Convolutional Network-Autoencoder Model // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 11. Art. 4551. DOI: 10.3390/app14114551.
- [18] 18. Huber P. J. Robust Statistics. New York: John Wiley & Sons, 1981.

- [19] 19. Rousseeuw P. J., Croux C. Alternatives to the Median Absolute Deviation // Journal of the American Statistical Association. 1993, Vol. 88, No. 424. P. 1273-1283. DOI: 10.1080/01621459.1993.10476408.

Азевич Марк Павлович. Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. Аспирант. Область научных интересов: анализ данных, машинное обучение, системы искусственного интеллекта.

Алетдинова Анна Александровна. Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. Доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления. Область научных интересов: анализ данных, машинное обучение, системы искусственного интеллекта.

Methodology for Anti-Noise Signal Validation in Multichannel Gas Turbine Engine Data

M.P. Azevich, A.A. Aletdinova

Abstract — The paper proposes a methodology for separating persistent pre-failure changes from random noise in multichannel gas turbine engine data. The methodology is built on stable-operation data: first, an external reference description of stable operation is formed; next, the deviation of each signal from this reference is evaluated and checked for persistence rather than accidental fluctuation. The confirmed deviations are then combined into a unit-level warning event. Validation on operational data showed that 41 confirmed signals remained out of 163 initial triggers in fault-related series, whereas 28 confirmed signals remained out of 67 on stable-operation data. The first confirmed signals in fault scenarios appeared in the interval of 4.3-16.1 hours before the failure. After the transition to the unit-level warning event, no false unit-level warnings were obtained over 126.8 hours of stable operation, while in 5 out of 6 fault scenarios the warning was formed in the interval of 4.3-9.1 hours before the failure. These results indicate that the methodology can be used as an independent signal-preparation stage for diagnostic and prognostic systems.

Keywords — anti-noise validation, gas turbine engine, multichannel telemetry, failure precursors, early diagnostics, stable operation.

REFERENCES

- [1] Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483-1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- [2] 2. Tahan M., Tsoutsanis E., Muhammad M., Abdul Karim Z. A. Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: A review // *Applied Energy*. 2017. Vol. 198. P. 122-144. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.048.
- [3] 3. Hanachi H., Mechefske C., Liu J., Banerjee A., Chen Y. Performance-Based Gas Turbine Health Monitoring, Diagnostics, and Prognostics: A Survey // *IEEE Transactions on Reliability*. 2018. Vol. 67, No. 3. P. 1340-1363. DOI: 10.1109/TR.2018.2822702.
- [4] 4. Fentaye A. D., Baheta A. T., Gilani S. I. U. H., Kyprianidis K. G. A Review on Gas Turbine Gas-Path Diagnostics: State-of-the-Art Methods, Challenges and Opportunities // *Aerospace*. 2019. Vol. 6, No. 7. Art. 83. DOI: 10.3390/aerospace6070083.
- [5] 5. GOST R ISO 17359-2015. Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidelines [in Russian].
- [6] 6. GOST R ISO 13379-1-2015. Condition monitoring and diagnostics of machines. Data interpretation and diagnostic techniques. Part 1. General guidelines [in Russian].
- [7] 7. GOST R ISO 13373-1-2009. Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration condition monitoring. Part 1. General procedures [in Russian].
- [8] 8. GOST R ISO 13373-2-2009. Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration condition monitoring. Part 2. Processing, analysis and presentation of vibration data [in Russian].
- [9] 9. GOST R ISO 13379-2-2016. Condition monitoring and diagnostics of machines. Data interpretation and diagnostic techniques. Part 2. Data-driven applications [in Russian].
- [10] 10. Perevoschikov S. I. Methodology for parametric diagnostics of gas-compressor units with a turbine drive // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*. 2016. No. 5(119). pp. 101-108. DOI: 10.31660/0445-0108-2016-5-101-108 [in Russian].
- [11] 11. Semushkin A. V., Podloznyi A. O., Chernikova E. A., Shchurovskiy V. A. Methodological principles of parametric diagnostics of the technical condition of gas-turbine gas-compressor units // *Vesti gazovoy nauki*. 2017. No. 1(29). pp. 22-31 [in Russian].
- [12] 12. Baikov I. R., Smorodova O. V., Kitaev S. V., Shammazov A. M. Diagnostics of the condition of gas-compressor units using special methods for interpreting vibration velocity spectra // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. Vol. 330. No. 4. pp. 59-67. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/196 [in Russian].
- [13] 13. Dedyukhin A. S., Andreev K. D. Diagnostics of gas turbine unit faults using vibration diagnostics // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2021. Vol. 5-1(56). pp. 16-25. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-5-1-16-25 [in Russian].
- [14] 14. Chu T., Nguyen T., Yoo H., Wang J. A review of vibration analysis and its applications // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 5. Art. e26282. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26282.
- [15] 15. Basseville M., Nikiforov I. V. *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [16] 16. Miao D., Feng K., Xiao Y., Li Z., Gao J. Gas Turbine Anomaly Detection under Time-Varying Operation Conditions Based on Spectra Alignment and Self-Adaptive Normalization // *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 3. Art. 941. DOI: 10.3390/s24030941.
- [17] 17. Fahmi A.-T. W. K., Kashyzadeh K. R., Ghorbani S., Jawad J. Advancements in Gas Turbine Fault Detection: A Machine Learning Approach Based on the Temporal Convolutional Network-Autoencoder Model // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 11. Art. 4551. DOI: 10.3390/app14114551.
- [18] 18. Huber P. J. *Robust Statistics*. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [19] 19. Rousseeuw P. J., Croux C. Alternatives to the Median Absolute Deviation // *Journal of the American Statistical Association*. 1993. Vol. 88, No. 424. P. 1273-1283. DOI: 10.1080/01621459.1993.10476408