

УДК 629.7.03

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА УРОВНЯ ВИБРАЦИИ

Д. С. Легконогих¹, В. А. Москаев²

¹leg_ds@mail.ru, ²moskaev82@mail.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (ВУНЦ ВВС «ВВА»)

Поступила в редакцию 10.12.2020

Аннотация. Приводится один из возможных подходов к решению задачи оценки технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, а именно его вибрационного состояния на основе применения математического аппарата фрактального анализа. Эффективность применения данного подхода иллюстрируется на примере выявления повышенного уровня вибрации турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания АЛ-31Ф по результатам обработки статистической информации, зарегистрированной бортовыми средствами объективного контроля при работе двигателей данного типа в полете.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; виброскорость; техническое состояние; контроль; диагностика; фрактальная размерность; фрактальный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Качество диагностирования зависит от полноты информации, получаемой об объекте. Увеличение объема такой информации может быть достигнуто повышением количества устанавливаемых на объект датчиков, как первичных источников информации. Однако количество датчиков ограничено в связи с нежелательным усложнением системы диагностики и, как следствие, вероятным снижением ее надежности. Поэтому на современном этапе развития диагностики перспективным направлением является разработка новых подходов и методов обработки снятой с датчиков информации о техническом состоянии (ТС) объекта.

Задачи диагностики в ряде случаев являются трудно формализуемыми, т.к. характеризуются большим числом случайных факторов, действующих на газотурбинные двигатели (ГТД) в эксплуатации, множественностью причинно-следственных связей между данными факторами, отсутствием или слож-

ностью формальных алгоритмов решения, неполнотой и нечеткостью исходных данных, нечеткостью конечных целей и ограничений при принятии решений.

В настоящее время оценка большинства измеряемых параметров авиационных ГТД в полете производится методом допускового контроля, когда экипажу выдается сигнал о выходе параметра за допустимые пределы. В данном случае возникший отказ уже является свершившимся фактом, вынуждающим экипаж принять соответствующие меры. При этом в большинстве случаев отказов увеличение (либо снижение) параметра выше (ниже) допуска является не мгновенным, а развивается в течение определенного времени.

На истребителях четвертого поколения широкое применение получила система объективного контроля, включающая бортовые устройства регистрации параметров полета типа «Тестер-У3» и наземные устройства обработки полетной информации «Топаз». Система «Тестер-У3» предна-

значена для сбора, преобразования, регистрации на магнитную ленту и сохранения в случае летного происшествя информации, характеризующей техническое состояние основных систем и агрегатов воздушного судна, его траекторию движения и положение в пространстве, а также действия экипажа в полете. В состав комплекта системы «Тестер-УЗ» входят: блок сбора полетной информации, защищенный бортовой накопитель, блок установки служебных параметров, датчики, внешние согласующие устройства, коммутатор. Наземный комплекс обработки полетной информации «Топаз» на базе персональной ЭВМ предназначен для ввода, расшифровки, анализа и хранения полетной информации, зарегистрированной бортовыми средствами объективного контроля типа «Тестер-УЗ», МСРП-64, БУР-4 и позволяет обеспечить автоматизированную и экспресс-обработку информации после каждого полета при подготовке ВС к повторному полету и послеполетной подготовке. Состав комплекса «Топаз» может быть различен в зависимости от варианта комплектации и в общем виде включает: ПЭВМ, устройства воспроизведения и записи информации, комплект специального программного обеспечения [1]. Однако существующая система объективного контроля показала низкую эффективность ввиду ограниченных возможностей устройств обработки информации [2]. Поэтому задача распознавания зарождающихся отказов на ранних стадиях на основе анализа предшествующего и текущего ТС авиационных ГТД с целью недопущения их возникновения в полете является актуальной и требует применения качественно новых подходов.

К перспективным направлениям развития систем оценки ТС можно отнести:

- использование высокотехнологичных и высокоточных датчиков и сигнализаторов;
- использование беспроводных каналов передачи информации с датчиков, а также спутниковой связи для передачи информации о ТС двигателей во время полета в единый технический центр сбора и анализа данных;

– применение новых методов обработки поступающей с датчиков информации с целью раннего обнаружения зарождающихся отказов [2].

Для решения данной задачи применяются различные методы обработки поступающих от датчиков сигналов. Прогнозирование ТС осуществляется путем анализа тренда параметров. Однако ввиду различных факторов в ряде случаев отсутствует тренд у анализируемых параметров либо его выявление является затруднительным.

В данной статье рассматривается задача оценки вибрационного состояния авиационных ГТД на основе фрактального анализа уровня виброскорости корпусов двигателей.

Сам термин «фрактал», введенный Б. Б. Мандельбротом для описания самоподобных структур с дробной размерностью, происходит от английского слова «дробный». Количественной характеристикой фрактала является фрактальная размерность D . Универсальность фракталов заключается в том, что они инвариантны к природе объекта – физической, химической, биологической или какой-либо другой. Свойство универсальности фрактальных структур позволяет использовать фрактальную размерность как единую количественную меру разупорядоченности структуры различной природы. Во многих областях традиционно используется евклидова размерность, позволяющая описывать точечные объекты размерностью $D = 0$, отрезки прямых линий – $D = 1$, плоских элементов – $D = 2$, объемных – $D = 3$. Однако природа изобилует объектами с дробной размерностью, т.е. не отвечающей ни одному из указанных значений. Их структура может быть количественно оценена фрактальной размерностью, которая в силу того, что объект разрежен, всегда больше топологической размерности [3].

Фрактальная размерность временного ряда исследуемого параметра характеризует степень «изрезанности» кривой и может выступать простым и в то же время достаточно информативным *количественным критерием*, позволяющим оценить ТС авиационных ГТД по уровню вибрации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Виброскорость $V_{\text{вibr}}$ является функцией амплитуды отклонения корпуса (прогиба роторов двигателя) y от неподвижного состояния при работе ГТД: $V_{\text{вibr}} = dy/dt$. Известно, что величина прогиба ротора ГТД с коэффициентом жесткости (упругости) K , имеющего дисбаланс (эксцентриситет, определяемый величиной отклонения центра масс от центра крепления ротора) e , зависит от частоты вращения ω (режима работы ГТД):

$$y = \frac{m\omega^2 e}{K - m\omega^2}. \quad (1)$$

Величина, обратная коэффициенту жесткости $1/K$, характеризует податливость опор роторов, которая зависит в том числе и от их ТС.

Оценку вибрационного состояния авиационных ГТД выполним на основе сигналограмм виброскорости двигателей АЛ-31Ф для восьми полетов истребителей типа Су-27. Для каждого полета найдем максимальное значение виброскорости для левого и правого двигателей. Приняв допущение, что вероятность одновременного появления неисправностей обоих двигателей на одном самолете мала, предварительно оценить ТС можно по разности максимальных значений виброскорости левого и правого двигателей:

$$\Delta_i = |V_{\text{вibr л}} - V_{\text{вibr пр}}|. \quad (2)$$

Далее определим значение фрактальной размерности D_i для каждого из восьми полетов с помощью программы обработки изображений кривых ImageJ, реализующей метод подсчета ячеек, на основе которого определяется значение фрактальной размерности виброскорости для каждого случая. Данный метод заключается в покрытии исследуемой области равномерной квадратной сеткой с длиной стороны квадратной

ячейки ε и с числом ячеек N . Тогда фрактальная размерность произвольного множества будет равна:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)}. \quad (3)$$

Вследствие того, что величина вибрации во многом зависит от режима работы ГТД, то целесообразно оценивать не абсолютную фрактальную размерность виброскорости $D_{\text{вibr}}$, а ее значение относительно фрактальной размерности частоты вращения ротора D_{n1} . Для двухроторного двигателя выберем ротор низкого давления (РНД) ввиду изменения его частоты вращения в более широких пределах, чем ротора высокого давления. Предлагаемый критерий имеет вид:

$$K_D = \frac{D_{\text{вibr}}}{D_{n1}}. \quad (4)$$

Полученная величина критерия K_D и будет являться тем диагностическим признаком, на основе которого будет оцениваться вибрационное состояние ГТД и будут формироваться соответствующие выводы, а также прогноз по его дальнейшему изменению. Оценка величины K_D одних и тех же двигателей в разных полетах позволит сделать выводы о наличии либо отсутствии тренда изменения виброскорости.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Было проанализировано восемь различных полетов самолетов типа Су-27 и, соответственно, вибрационное состояние шестнадцати двигателей АЛ-31Ф, полученное по результатам обработки в системе «Топаз» полетных данных, зарегистрированных бортовым устройством «Тестер-УЗ».

На рис. 1–8 представлены сигналограммы изменения виброскорости левого и правого двигателей в течение полета.

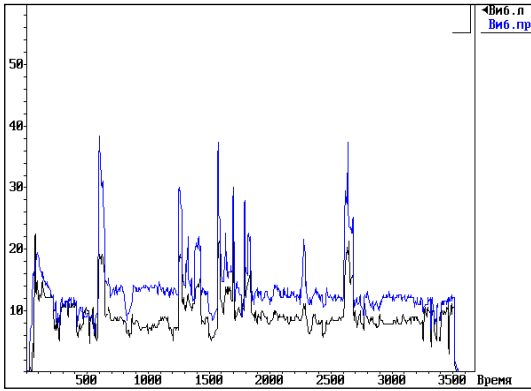


Рис. 1. Полет № 1

($V_{\text{вибр.мах л}} = 24 \text{ мм/с}$; $V_{\text{вибр.мах пр}} = 40 \text{ мм/с}$)

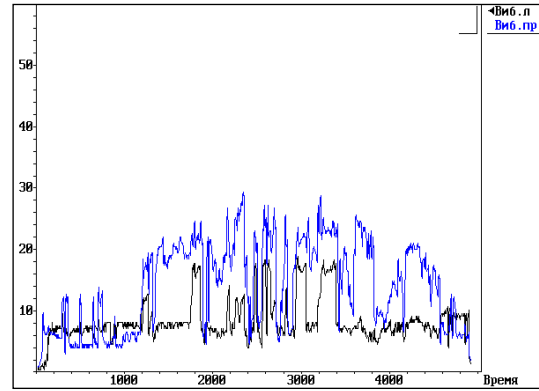


Рис. 5. Полет № 5

($V_{\text{вибр.мах л}} = 19 \text{ мм/с}$; $V_{\text{вибр.мах пр}} = 30 \text{ мм/с}$)

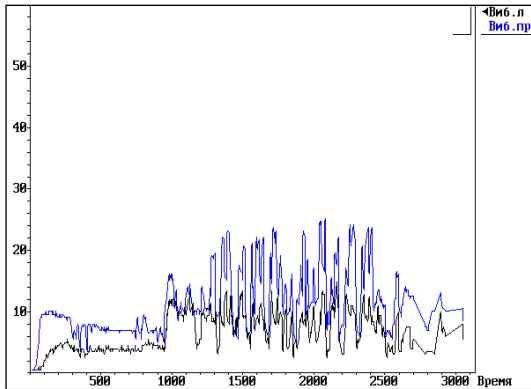


Рис. 2. Полет № 2

($V_{\text{вибр.мах л}} = 16 \text{ мм/с}$; $V_{\text{вибр.мах пр}} = 25 \text{ мм/с}$)

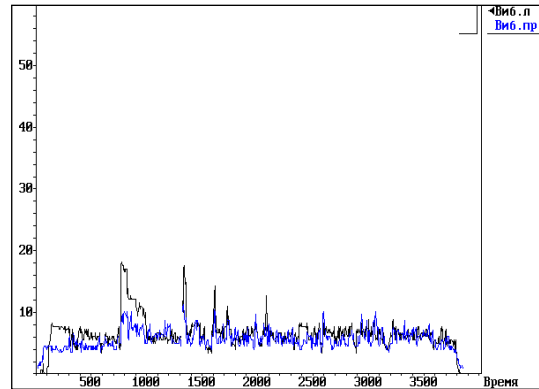


Рис. 6. Полет № 6

($V_{\text{вибр.мах л}} = 18 \text{ мм/с}$; $V_{\text{вибр.мах пр}} = 13 \text{ мм/с}$)

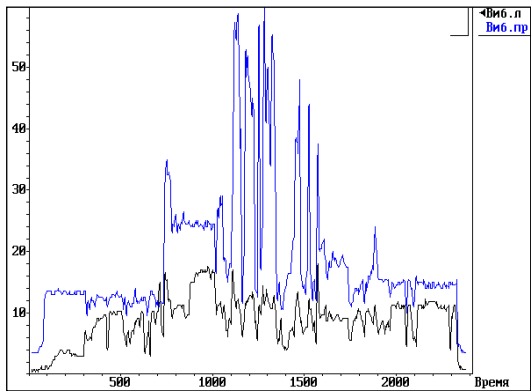


Рис. 3. Полет № 3

($V_{\text{вибр.мах л}} = 20 \text{ мм/с}$; $V_{\text{вибр.мах пр}} = 60 \text{ мм/с}$)

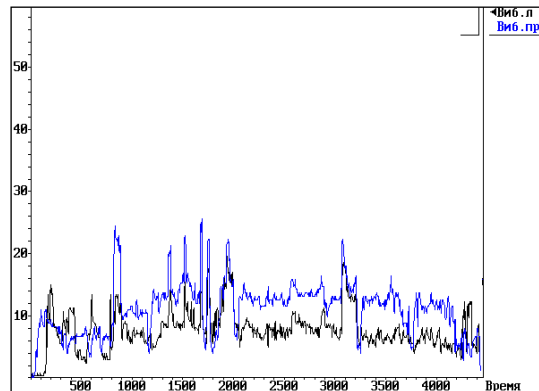


Рис. 7. Полет № 7

($V_{\text{вибр.мах л}} = 20 \text{ мм/с}$; $V_{\text{вибр.мах пр}} = 25 \text{ мм/с}$)

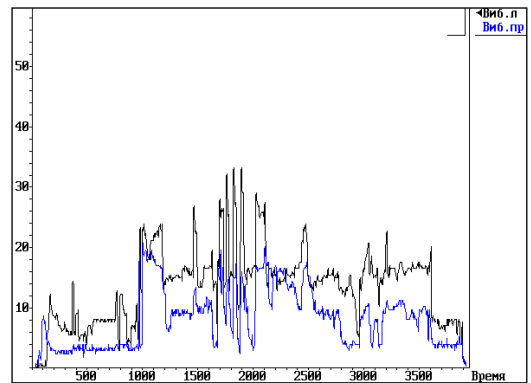


Рис. 4. Полет № 4

($V_{\text{вибр.мах л}} = 35 \text{ мм/с}$; $V_{\text{вибр.мах пр}} = 22 \text{ мм/с}$)

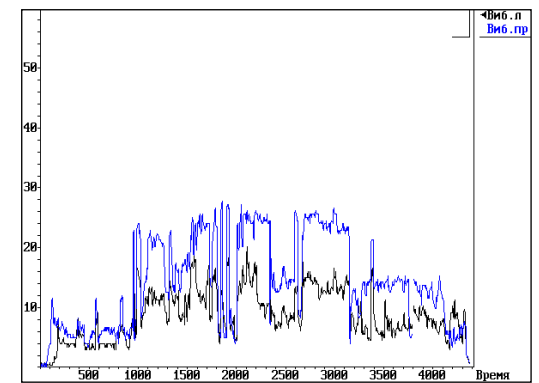


Рис. 8. Полет № 8

($V_{\text{вибр.мах л}} = 20 \text{ мм/с}$; $V_{\text{вибр.мах пр}} = 28 \text{ мм/с}$)

В соответствии с принятым методом допускового контроля выдается сигнал о повышенной вибрации при достижении значения виброскорости 50 мм/с. Из представленных сигналограмм видно, что в полете № 3 максимальное значение виброскорости правого двигателя достигло значения 60 мм/с, что свидетельствует о явной неисправности ГТД по причине повышенной вибрации. Остальные двигатели с точки зрения существующего метода контроля являются исправными, хотя фактические уровни вибрации у них различаются весьма существенно. Метод допускового контроля не позволяет выполнить анализ тренда виброскорости (если таковой имеется) и осуществить прогнозирование изменения данного параметра. Зависимости виброскорости от частоты вращения РНД $V_{\text{вibr}} = f(n_1)$ для всех ГТД удобно представить на одном графике (рис. 9).

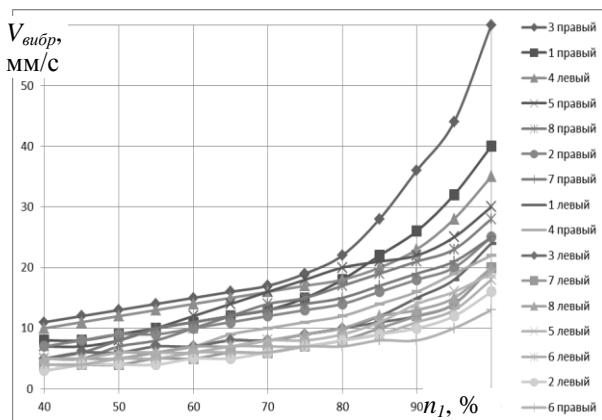


Рис. 9. Зависимости виброскорости от частоты вращения РНД

Существует множество различных алгоритмов определения фрактальной размерности. В работе [4] приводится сравнение точности определения фрактальной размерности различными методами на примере кривой Киссветтера (рис. 10), для которой значение фрактальной размерности известно и составляет $D = 1,5$.



Рис. 10. Кривая Киссветтера с фрактальной размерностью $D = 1,5$

В настоящей работе кривая Киссветтера была использована в качестве эталона для определения количества ячеек, на которые в программе ImageJ необходимо разбить изображения сигналограмм полета для получения наибольшей точности. Расчет фрактальной размерности эталонной кривой Киссветтера в программе ImageJ для различного числа ячеек N дал следующие результаты:

- 64 ячейки – $D = 1,534$;
- 128 ячеек – $D = 1,504$;
- 256 ячеек – $D = 1,472$;
- 512 ячеек – $D = 1,474$;
- 1024 ячеек – $D = 1,480$.

Для масштаба с числом ячеек $N = 128$ была получена максимальная точность (минимальная погрешность $\delta = 1,504 - 1,5 = 0,004$), поэтому в дальнейших расчетах использовался именно этот масштаб.

Данные системы объективного контроля, а также результаты расчета фрактальных размерностей виброскорости всех ГТД приведены в табл. 1.

Система объективного контроля идентифицировала превышение уровня вибрации правого двигателя в полете № 3 (максимально допустимым является виброскорость 50 мм/с). Далее предварительная оценка ТС с использованием формулы 2 свидетельствует о несколько повышенном уровне вибрации правого двигателя в поле-

те № 1, левого в полете № 4 и правого в полете № 5 по отношению к другим ГТД ($\Delta_i = 16, 13$ и 11 соответственно).

Таблица 1

Результаты расчета критерия K_D

№ полета	Двигатель	$V_{\text{вибр max}}$ мм/с	$D_{\text{вибр}}$	D_{nl}	K_D
1	левый	24	1,209	1,274	0,949
	правый	40	1,270		0,999
2	левый	16	1,259	1,472	0,855
	правый	25	1,278		0,868
3	левый	20	1,255	1,442	0,870
	правый	60	1,480		1,026
4	левый	35	1,257	1,296	0,970
	правый	22	1,233		0,951
5	левый	19	1,154	1,202	0,960
	правый	30	1,202		1
6	левый	18	1,172	1,334	0,879
	правый	13	1,151		0,863
7	левый	20	1,210	1,280	0,945
	правый	25	1,229		0,960
8	левый	20	1,233	1,330	0,927
	правый	28	1,274		0,958

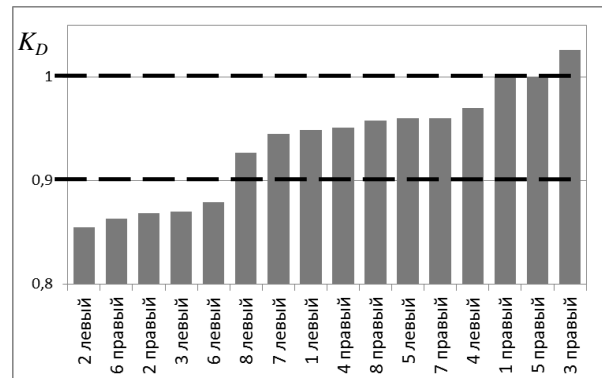
Устойчивость временных рядов виброскорости можно оценить показателем Хёрста:

$$H = 2 - D_{\text{вибр}}. \quad (5)$$

При $0 < H < 0,5$ исследуемая величина является антиперсистентной, при $0,5 < H < 1$ – персистентной, в случае $H = 0,5$ процесс случайный. Т.к. показатель Хёрста для параметра виброскорости лежит в пределах $0,5 < H_{\text{вибр}} < 1$, то можно сделать вывод о его персистентности (устойчивости), т.е. в случае наличия восходящего тренда виброскорости данная тенденция будет продолжаться.

Итоговая оценка ТС двигателей по параметру виброскорости производится по предложенному критерию K_D . Полученные значения критерия K_D свидетельствуют о явном отказе правого двигателя в полете № 3. Два двигателя (левый в полете № 5 и правый в полете № 7) имеют значения критерия K_D равные 0,96. Примем это значение за пороговое, выше которого виброскорость будем считать повышенной. Таким образом, в соответствии с принятым допущением можно говорить о возможных зарождающихся отказах правого двигателя в полете

№ 1, левого – в полете № 4 и правого – в полете № 5 ввиду превышения значений критерия K_D относительно его порогового значения (рис. 11).

Рис. 11. Значения критерия K_D для всех ГТД

Результаты расчетов, представленные на рис. 11, коррелируют с зависимостями на рис. 9, свидетельствуя о том, что критерий K_D корректно отражает вибрационное состояние двигателей и может использоваться для оценки их ТС по параметру виброскорости.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА С СОВРЕМЕННЫМИ МЕТОДАМИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Существующие инструментальные методы оценки ТС ГТД подразделяются на две большие группы: физические и параметрические [2]. Физические методы оценки основаны на использовании различных физических явлений для определения признаков изменения ТС. С помощью физических методов осуществляют контроль ТС ГТД, а с учетом анализа признаков – диагностирование и прогнозирование. Параметрические методы оценки ТС основаны на специальной обработке и анализе значений функциональных параметров, измеряемых на работающем двигателе, и делятся на несколько групп:

- допусковый контроль;
- статистический анализ изменения функциональных параметров и их комплексов;
- образный анализ состояний;
- диагностирование с использованием математических моделей.

Допусковый контроль предполагает сравнение текущего значения параметра с его предельно допустимым значением и широко применяется для оперативной оценки ТС ГТД в полете. Диагностирование и прогнозирование ТС в настоящее время реализуется на основе статистического анализа тенденций изменения параметров (трендов) с последующей их интерпретацией для одного и того же ГТД на одинаковых режимах работы.

Перспективным является образный анализ состояний, предполагающий сопоставление в поле функциональных параметров «образов» текущих состояний ГТД с заранее установленными, представляющими собой «образы» (портреты) неисправных состояний. В качестве «образов» могут фигурировать области в пространстве состояний (методы определения фазовых пространств), векторы (векторный анализ), изображения в поле «пространство–время», кривые в поле «параметр–наработка» (методы распознавания кривых) [5]. Поэтому интенсивно развиваются математические методы построения диагностических моделей на основе технологий искусственного интеллекта, в частности нейронных сетей. В работе [5] приводится описание автоматизированной системы «Диагностика», включающей модуль распознавания образов состояний и расчет прогнозируемых параметров по заранее обученной нейросетевой модели. Нейронные сети показывают достаточно высокую эффективность даже в случаях ограниченного количества диагностической информации, когда применение статистических и вероятностных методов затруднено.

Что касается оценки непосредственно вибрации ГТД на основе ТС опор роторов (подшипников), то в работе [6] проведен сравнительный анализ существующих методов диагностики:

– трендового анализа (контроль по предельному уровню среднеквадратического значения виброскорости, анализ амплитудно-частотной характеристики, анализ регрессионных вибромоделей, нейросетевые методы, адаптивный метод);

– анализа сигналов во временной области (анализ изменения пик-фактора, метод ударных импульсов, анализ изменения эксцесса, анализ собственных колебаний роторов);

– анализа сигналов в частотной области (метод прямого спектрального оценивания, октавный анализ, метод анализа спектра огибающей, вейвлет анализ, анализ передаточных функций);

– многомерного анализа параметров вибрации (анализ среднего положения вала, траектории перемещения центра вала).

Методы вибрационной диагностики подшипников, основанные на трендовом анализе, используют некоторое интегральное (усредненное) значение вибрационного сигнала в заданной полосе частот. Достоинствами методов данной группы являются простота аппаратуры, оперативность анализа. К недостаткам можно отнести низкую чувствительность и вероятность достоверного прогноза, так как эффективность проявляется при прогрессирующих повреждениях подшипников и значительном повышении уровня вибрации, при этом причины неисправности не могут вовремя анализироваться, что ведет к достаточно большому количеству случаев необоснованного снятия ГТД с эксплуатации.

Методы анализа сигналов во временной области оценивают вероятностные характеристики зарегистрированных сигналов, осредненные по времени. Достоинства методов заключаются в простоте их реализации, нетребовательности к стабильности частоты вращения роторов. Однако большинство методов данной группы сложны в реализации и имеют неустойчивую вероятность правильного диагноза для сложных конструкций, низкую помехозащищенность, при этом реализация в ряде случаев возможна только при непосредственной установке датчика на подшипник. Не все дефекты подшипников вызывают одиночные ударные импульсы и поэтому не могут быть диагностированы.

Методы вибрационной диагностики, основанные на анализе сигналов в частотной области, требуют предварительной разра-

ботки сложных диагностических моделей. К несомненному достоинству данных методов относится их высокая информативность, так как они дают возможность оценивать генерируемые отдельными узлами частоты. Недостатками являются нечувствительность к зарождающимся дефектам, некорректность результатов при обработке нестационарных режимов, высокие требования к качеству используемого оборудования и квалификации специалистов, сложность анализа результатов, что ограничивает применение данных методов на практике.

Методы многомерного анализа параметров вибрации имеют высокую информативность, точность диагноза, наглядность представления результатов, но для подшипников качения в составе ГТД сложно применимы из-за невозможности установки датчиков непосредственно у элементов опор роторных систем, а также отсутствия возможности определения характера и направления прецессионных движений ротора и сложности интерпретации различных процессов.

Анализ рассмотренных методов позволяет сделать вывод, что ни один из них в полной мере не удовлетворяет всем предъявляемым требованиям. Большинство методов становятся информативны и эффективны только при существенных повреждениях подшипников. Предложенная в работе [6] комплексная методика виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор ГТД позволяет определять ТС подшипников на различных стадиях возникновения и развития повреждений, однако также требует специального оборудования, значительных временных затрат и высокой квалификации специалистов.

Предлагаемый в данной статье метод фрактального анализа, по сути, представляет собой одну из разновидностей метода обобщенного анализа состояний и позволяет оперативно в полете оценивать вибрационное состояние ГТД на основе простого и информативного количественного критерия. Рассчитанные значения критерия K_D для разных ГТД показывают, что возможности предлагаемого метода позволяют не только провести оперативную количественную оценку исследуемого параметра (в данном

случае виброскорости), но и спрогнозировать его тренд на ближайший полет. Однако эффективность и достоверность применения метода фрактального анализа по сравнению с существующими методами в полной мере можно оценить только на основе анализа большого объема статистической информации по сведениям, полученным в течение длительной наработки в полете разных ГТД с возникшими отказами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена возможность использования фрактальной размерности как количественной меры вибрационного состояния ГТД. Предложен критерий K_D , как отношение фрактальных размерностей величин виброскорости к соответствующим фрактальным размерностям частот вращения РНД. Использование данного критерия позволяет:

– получить количественную оценку степени «изрезанности» временного ряда виброскорости по отношению к частоте вращения РНД;

– сделать вывод о ТС (возможном зарождающемся отказе), сравнив полученные значения критерия K_D с некоторым пороговым значением, полученным из анализа статистической информации.

Кроме того, при наличии статистической информации в течение определенного временного интервала сравнение значений критерия K_D для одного и того же ГТД в разных полетах позволит сделать вывод о наличии (отсутствии) тренда виброскорости.

Предложенный критерий K_D позволяет оценить как текущее вибрационное состояние ГТД, так и выполнить прогноз с целью эффективной реализации стратегии эксплуатации АТ «по состоянию» и повышения уровня безопасности полетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ипполитов С. В., Кучевский В. Л., Юдин В. Т. Методы и средства объективного контроля. Воронеж: ВАИУ, 2011. 238 с. [S. V. Ippolitov, V. L. Kuchevsky, V. T. Yudin, *Methods and means of objective control*, (in Russian). Voronezh: VAIU, 2011.]
2. Надежность и техническая диагностика. Контроль и диагностирование авиационных силовых установок / А. Н. Горский [и др.]. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского,

2007. 116 с. [A. N. Gorsky, et al., *Reliability and technical diagnostics. Control and diagnostics of aircraft power plants*, (in Russian). Moscow: VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 2007.]

3. **Иванова В. С., Закирничная М. М., Кузеев И. Р.** Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. Уфа: УГНТУ, 1998. Ч. 1. 144 с. [V. S. Ivanova, M. M. Zakirnichnaya, I. R. Kuzeev, *Synergetics and fractals. Universality of mechanical behavior of materials*, (in Russian). Vol. 1. Ufa: UGNTU, 1998.]

4. **Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова [и др.].** М.: Наука, 1994. 383 с. [V. S. Ivanova, et al., *Synergetics and fractals in materials science*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1994. 383 p.]

5. **Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей: монография / В. И. Дубровин [и др.].** Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2003. 279 с. [V. I. Dubrovin, et al., *Intellectual means of diagnostics and forecasting of aircraft engine reliability*, (in Russian). Zaporozhye: ОАО "Motor-Sich", 2003.]

6. **Зубко А. И.** Комплексная методика виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ, 2020. 167 с. [A. I. Zubko, *Complex method of vibroacoustic diagnostics of the technical condition of bearing supports of gas turbine engines*: Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Moscow: MAI, 2020.]

ОБ АВТОРАХ

ЛЕГКОНОГИХ Денис Сергеевич, доц. каф. АД. Дипл. инж.-мех. (Ставропольский филиал ВВИА, 2004). Канд. техн. наук по диагностике техн. систем (ВАИУ, 2010). Иссл. в обл. диагностики техн. состояния газотурбинных двигателей.

МОСКАЕВ Вячеслав Александрович, ст. преп. каф. АД. Дипл. инж.-мех. (Ростовский ВИ РВ, 2004). Канд. техн. наук по упр. в техн. системах (Ростовский ВИ РВ, 2011). Иссл. в обл. фрактальных моделей управления в технических системах.

METADATA

Title: Technical condition assessment of aircraft gas turbine engines based on fractal analysis of the vibration level.

Authors: D. S. Legkonogikh¹, V. A. Moskaev²

Affiliation:

Military training and research center of the air force "Air force academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (VUNTS VVS "VVA"), Russia.

Email: ¹leg_ds@mail.ru, ²moskaev82@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 1 (91), pp. 41-49, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The article presents one of the possible approaches to solving the problem of the technical condition assessing of aviation gas turbine engines, namely its vibration state, based on the use of the mathematical apparatus of fractal analysis. The effectiveness of this approach is illustrated by the detection of excessive vibration turbojet dual-circuit engine with afterburner combustion chamber AL-31F according to the results of processing statistical infor-

mation, was on-Board means of objective control with the work of engines of this type in flight.

Key words: gas turbine engine; vibration speed; technical condition; control; diagnostics; fractal dimension; fractal analysis.

About authors:

LEGKONOGIKH, Denis Sergeevich, Assoc. Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. Mechanic (Stavropol branch of Air Force Engin. Academy, 2004). Cand. of Tech. Sci. (VAIU, 2011).

MOSKAEV, Vjacheslav Aleksandrovich, Senior lecturer, Dept. of Aircraft Engines. Dipl. Mechanic (Rostov-on-Don Military Inst., 2004). Cand. of Tech. Sci. (RVI RV, 2011).