

Научная статья  
УДК 621.377.037.3, 629.7.016  
DOI: 10.34759/vst-2021-4-151-162

## ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ ОПОР ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ РИТМОГРАММ И СКАТТЕРОГРАММ

Дмитрий Александрович Балакин<sup>1</sup> ✉, Алексей Игоревич Зубко<sup>2</sup>,  
Анна Александровна Зубко<sup>3</sup>, Виталий Васильевич Штыков<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

<sup>2,3</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,  
Москва, Россия

<sup>1</sup>dabalakin@yandex.ru ✉

<sup>2</sup>zbk2@yandex.ru

<sup>3</sup>shkuratenko.anna@mail.ru

<sup>4</sup>shtykovvv@ya.ru

**Аннотация.** Рассматривается возможность использования ритмограммы и скаттерограммы для оценки технического состояния механических систем, в частности подшипников опор роторов газотурбинного двигателя. Построение ритмограммы и скаттерограммы осуществляется на основе разработанного метода обработки квазипериодических импульсных сигналов. В свою очередь, метод базируется на принципах корреляционной обработки, теории вейвлет-преобразования и преобразовании Эрмита. Приводятся результаты анализа ритмограмм и скаттерограмм, на основе которых дается заключение о техническом состоянии функционирования подшипников.

**Ключевые слова:** вибрационная диагностика подшипников опор, преобразование Эрмита, ритмограмма, скаттерограмма, квазипериодичность

**Для цитирования:** Балакин Д.А., Зубко А.И., Зубко А.А., Штыков В.В. Вибрационная диагностика технического состояния подшипников опор газотурбинных двигателей с помощью ритмограмм и скаттерограмм // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 151-162. DOI: 10.34759/vst-2021-4-151-162

Original article

## VIBRATION DIAGNOSTICS OF GAS TURBINE ENGINES BEARING ASSEMBLIES TECHNICAL CONDITION WITH RHYTHMOGRAMS AND SCATTEROGRAMS

Dmitry A. Balakin<sup>1</sup> ✉, Alexey I. Zubko<sup>2</sup>, Anna A. Zubko<sup>3</sup>, Vitaly V. Shtykov<sup>4</sup><sup>1,4</sup>National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia<sup>2,3</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, Moscow, Russia<sup>1</sup>dabalakin@yandex.ru ✉<sup>2</sup>zbc2@yandex.ru<sup>3</sup>shkuratenko.anna@mail.ru<sup>4</sup>shtykovvv@ya.ru

### Abstract

The introduction to the article is focused on the problem of early diagnostics of the aircraft gas turbine engine bearings. Particularly, the gas turbine engine bearing functioning period disrupts namely at its early developmental stage, which does not always succumb to estimation by the conventional methods. The authors suggest employing the apparatus widely known in medicine practice to analyze the occurring quasi-periodicity, namely rhythmogram and scatterogram.

A rhythmogram plotting is being realized based on the developed technique. The technique in its turn bases on the correlation processing principles, wavelet transform theory and Hermite transform. Briefly, the gist of the technique consists of the following: mutual correlation function of the studied signal of the bearing and reference function is being computed. The reference function is being plotted based on Hermite transform, and represents mirror reflection of the impulse characteristic of the complex quasi-matched filter. Wavelet processing principles application (scaling parameter variation) allows refining positions of the correlation function peaks. After the cross-correlation function threshold processing we obtain rhythmogram and scatterogram of the signal under study.

Further, the article considers processing of real signals of gas turbine bearing. Spectral and statistical analysis of the obtained rhythmograms and scatterograms is being performed. Inferences are being drawn on the state of the bearings under study.

Conclusion considers further prospects of the rhythmograms and scatterograms application as diagnostics tools for aircraft gas turbine engines.

**Keywords:** vibration diagnostics of rotor bearings, Hermite transformation, rhythmogram, scatterogram, quasi-periodicity

**For citation:** Balakin D.A., Zubko A.I., Zubko A.A., Shtykov V.V. Vibration diagnostics of gas turbine engines bearing assemblies technical condition with rhythmograms and scatterograms. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 151-162. DOI: 10.34759/vst-2021-4-151-162

### Введение

Особое место в машиностроении занимают авиационные газотурбинные двигатели (ГТД), которые, по сути, определяют облик будущего объекта эксплуатации для энергетических ГТД или летательного аппарата. Газотурбинный двигатель является сложной технической системой,

в которой присутствует большое количество разнообразных источников колебаний. Наличие данных источников вызывает серьезное зашумление полезных вибрационных сигналов и ослабление их амплитуд, а их взаимодействие приводит к появлению нелинейных процессов на корпусе двигателя, что очень сильно осложняют оп-

ределение и прогнозирование технического состояния ГТД, его узлов и агрегатов.

К ГТД предъявляют высокие требования по надежности и безопасности [1]. В связи с этим стоит актуальная задача не только осуществлять диагностику узлов, когда неисправность уже возникла, но и прогнозировать поведение системы в будущем [2]. Таким образом, обнаружение неисправности на ранней стадии развития не только продлит срок службы изделия при своевременном ремонте, уменьшит риск потери летательного аппарата, но и может спасти жизнь персонала или экипажа.

Одним из основных узлов, ограничивающих ресурс ГТД, являются подшипниковые опоры роторов [3, 4]. Задачу диагностики подшипников ГТД можно разбить на две составные части: аппаратную и программную. В *аппаратной части* преобладает инструментальное измерение параметров вибрации подшипников ГТД с использованием датчиков, устанавливаемых на корпусе двигателя или в наиболее приближенном месте конструкции к диагностируемому узлу [5]. Ниже рассматривается обработка сигналов, полученных этим способом. Стоит отметить, что активно развивается бесконтактное измерение [6, 7], которое имеет ряд преимуществ, одно из главных — отсутствие проводов от измерительных датчиков.

В *программной части* на ведущую роль в настоящее время претендуют методы диагностики, основанные на спектральном анализе [8—10]. Анализ спектра наиболее эффективен, когда повреждение проявляется в виде периодической составляющей, что обуславливается характерными частотными компонентами в спектре сигнала. Однако если испытания механизма проводятся в рабочем режиме — велика вероятность того, что дефект будет появляться спорадически или квазипериодически да еще и со случайными параметрами (например, изменение длительности импульсов — откликов системы).

Выделение и идентификация диагностических признаков неисправностей позволяет своевременно определить и спрогнозировать техническое состояние подшипников ГТД. В процессе диагностирования существует ряд проблем, которыми являются отсутствие достаточно полной математической модели, описывающей характерные свойства исследуемого объекта, необходимость постоянной адаптации к изменению динамических характеристик системы. К таким характеристикам можно отнести изменение формы

импульсов в сигнале, а также периода их следования. Таким образом, появляется необходимость оценки квазипериодичности импульсов системы с возможностью адаптироваться к локальным особенностям формы сигнала. В этом случае эффективность широко распространенных методов снижается.

В целом функционирование авиационных ГТД имеет много общего с функционированием живых объектов. Действительно, если цикличность работы конструкции ГТД связана с наличием в нем вращающихся или движущихся частей, то в живом организме ритм задает ведущий нервный центр.

В медицине, в частности в кардиологии, исследование квазипериодичности или вариабельности циклов является хорошо разработанным и широко распространенным методом диагностики состояния пациента [11]. Для целей такой диагностики кардиолог использует ритмограмму, которая отражает изменения интервалов между импульсами кардиограммы [12]. Другой популярный графический аппарат оценки вариабельности — скаттерограмма (или рассеивание), представляющая собой двумерную координатную плоскость, на которой отображаются предыдущий и последующий интервалы.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что для механических систем ритмограмма и скаттерограмма будут полезными инструментами диагностики. Нарушение ритма, а именно изменение параметров вибрационных процессов будет свидетельствовать о наличии неисправности.

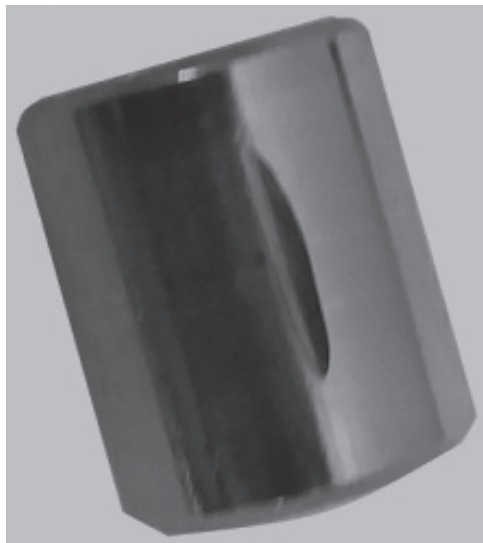
Прямой метод получения ритмограммы и скаттерограммы заключается в вычислении взаимной корреляционной функции (ВКФ) сигнала, опорной функции (ОФ) и последующей фиксации положения максимумов ВКФ на оси времени. Построение ОФ непосредственно по дискретной записи сигнала можно произвести, представляя отсчеты выделенного фрагмента в виде суммы ортогональных функций Гаусса—Эрмита (ФГЭ) [13], определенных в преобразовании Эрмита [14].

Рассмотрим более подробно процесс обработки на примере записей вибросигнала подшипников ГТД.

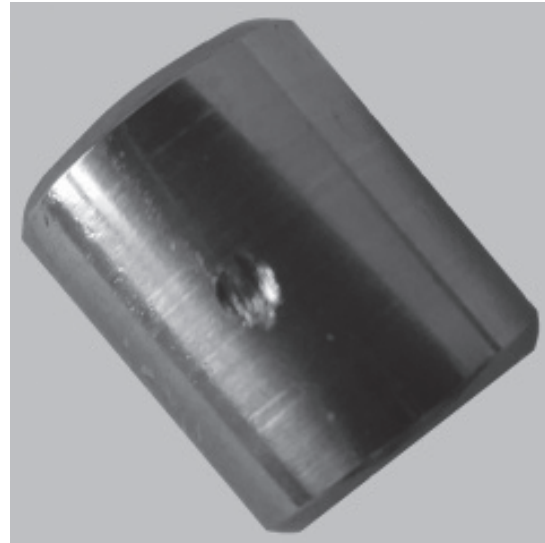
### **Определение диагностических признаков повреждений подшипников**

С целью определения диагностических признаков повреждения подшипников проводилось

натурное исследование, в результате которого выполнялся анализ вибрации, измеренной на наружном кольце подшипника. Для этого были отобраны роликоподшипники опор роторов одного из авиационных ГТД, имеющие наработку, но без видимых повреждений. На телах качения двух из них были нанесены механические повреждения в виде одной продольной риски на одном ролике подшипника и двух точек разных размеров на двух роликах другого подшипника (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Тела качения подшипников с повреждениями: а — средняя риска; б — точка большая и маленькая

Исследование проводилось на стенде исследования характеристик подшипников СП-180М [15], в процессе которого создавалась радиальная нагрузка до 50 кгс и раскручивание внутреннего кольца исследуемого подшипника до 3000 об/мин. Записи фрагментов трех сигналов подшипников во временной области представлены на рис. 2.

Длительность фрагментов сигнала составляет 3 с, причем каждый из подшипников работает на установившемся режиме. Сигнал  $S_1(t)$  — это исправная работа подшипника,  $S_2(t)$  и  $S_3(t)$  — подшипники с повреждениями.

В соответствии с алгоритмом анализа [13] необходимо выделить из исследуемого сигнала эталон. Эталон — это фрагмент записи, динамику (ритмику) которого мы хотим проследить на протяжении всего времени исследования. Эталон отражает отличительные признаки формы сигнала, которые могут означать как исправную работу устройства, так и неисправную. Из априорных сведений о сигналах  $S_1(t)$ ,  $S_2(t)$  и  $S_3(t)$  известно, что частота вращения сепаратора 23 Гц, частота

вращения тел качения 329 Гц, частота перекачивания тел качения по наружному кольцу 529 Гц, частота перекачивания тел качения по внутреннему кольцу 612 Гц. В связи с этим, прежде чем выделить эталон, произведем предварительную фильтрацию по схеме, которая представлена на рис. 3.

В соответствии со схемой рис. 3 сигнал исправного подшипника подвергается предварительной фильтрации, причем каждый из фильтров представляет собой полосовой фильтр с цен-

тральной частотой полосы пропускания, соответствующей частотной компоненте из априорных сведений. Также стоит отметить, что процедура фильтрации выполняется по отдельности, и на выходе каждого из фильтров сигнал суммируется. Коэффициенты передачи полосовых фильтров представлены на рис. 4,а; сигнал на выходе схемы обработки представлен на рис. 4,б.

Проведя анализ записи  $S_{1\phi}(t)$ , выбрали эталон длительностью 0.06 с как наиболее часто встречающийся фрагмент в сигнале (рис. 4,б).

Следующим этапом обработки является построение опорной функции (ОФ), основанное на функциях Гаусса—Эрмита (ФГЭ). Выделенный эталон складываем по базису ФГЭ. Спектр эталона в пространстве ФГЭ показан на рис. 5.

Из спектральной картины можно выделить три характерные полосы в пространстве ФГЭ. Первая полоса — с 30 по 70 ФГЭ — характеризует область вращения тел качения, вторая — с 85 до 120 ФГЭ — соответствует перекрытию тел качения по наружному кольцу, третья — с 120 по

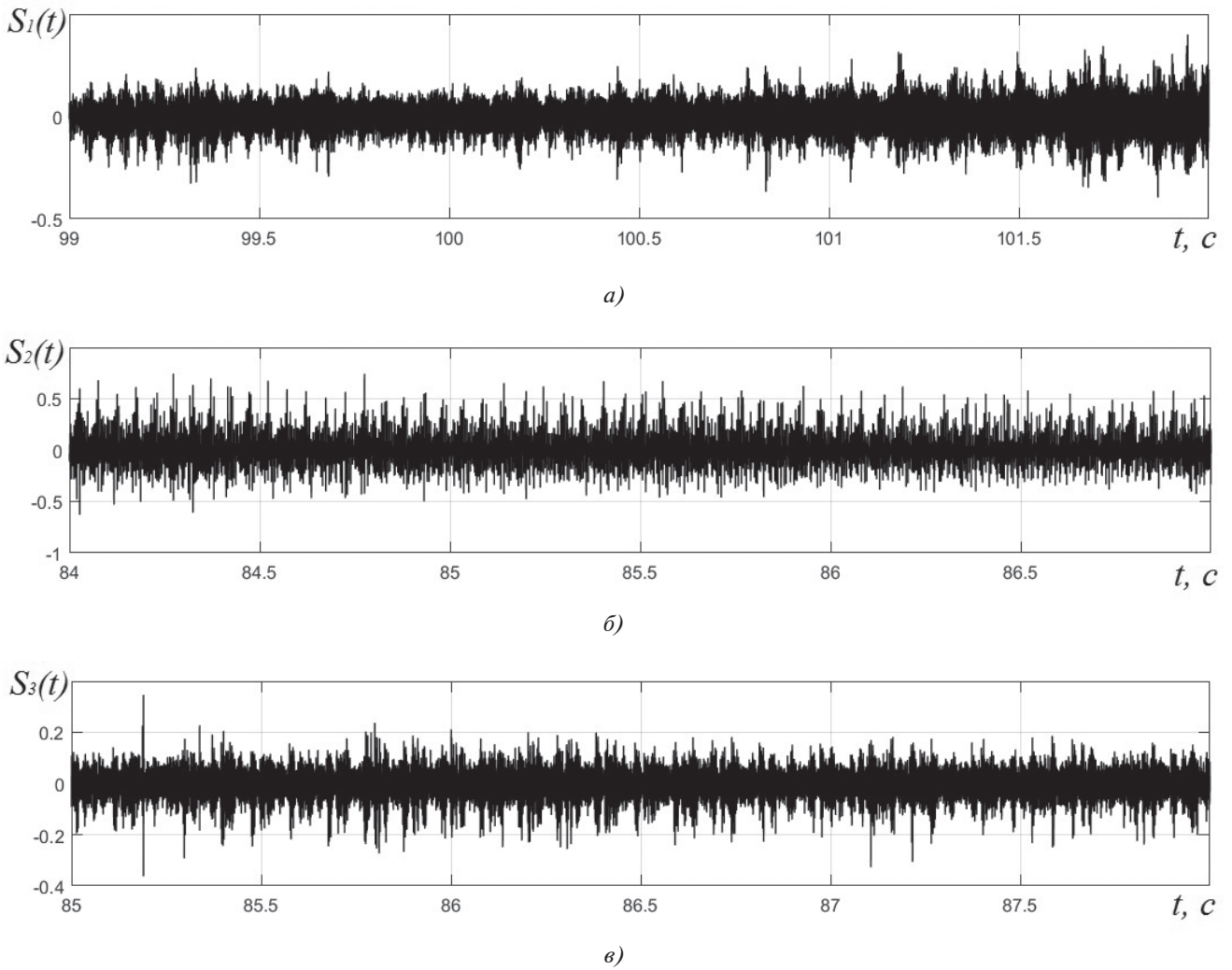


Рис. 2. Записи вибросигнала подшипников: а — исправная работа; б — повреждение — средняя риска; в — повреждение — точка большая и маленькая

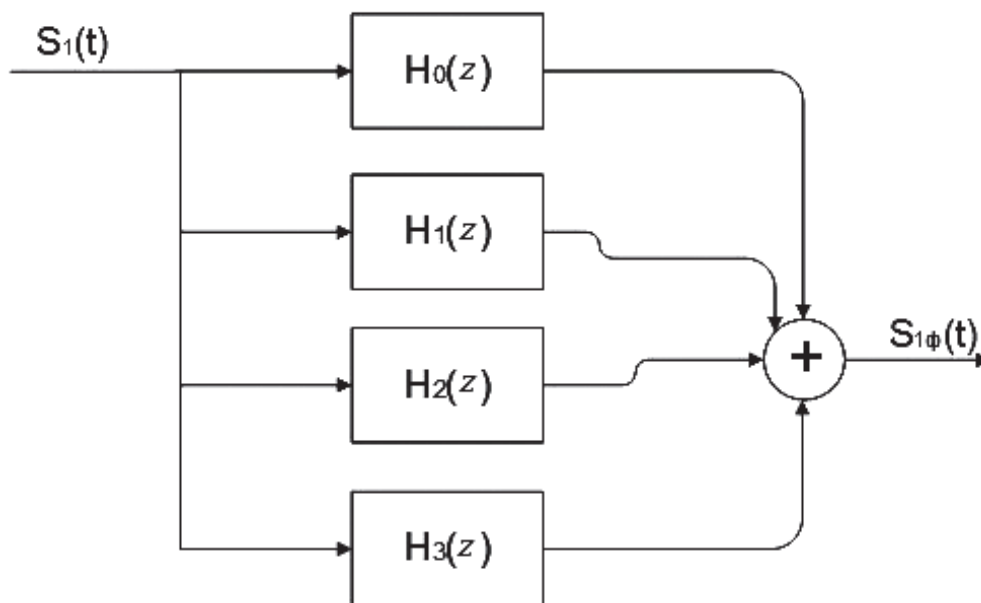
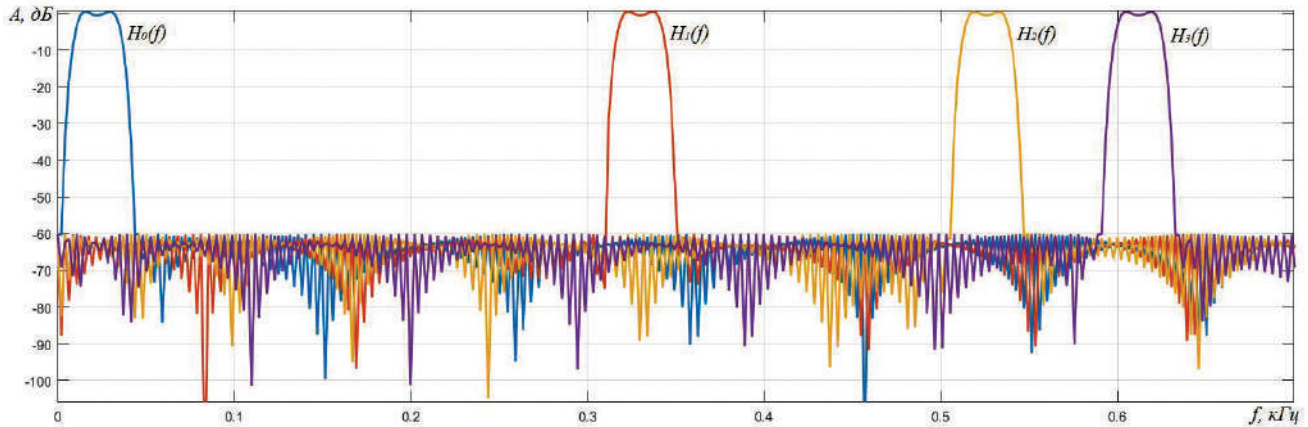
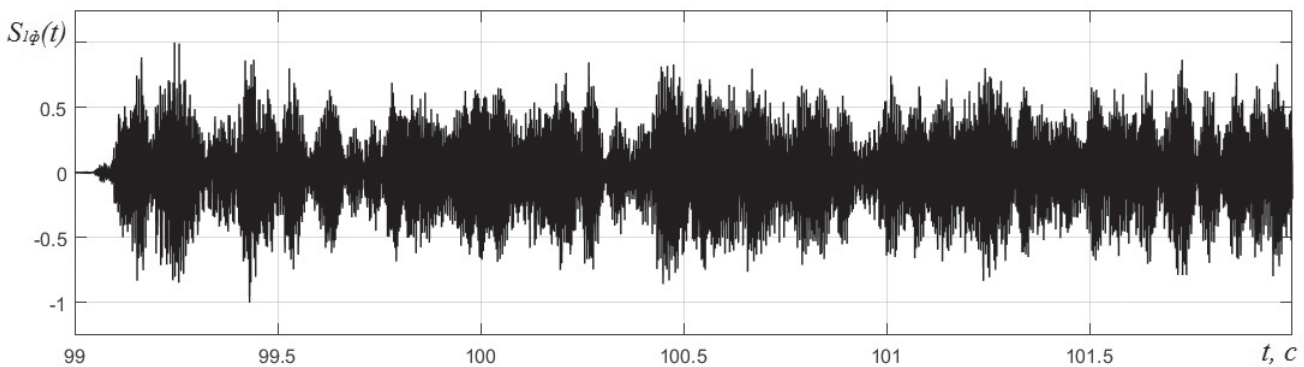


Рис. 3. Схема предварительной фильтрации



a)



б)

Рис. 4. Предварительная фильтрация: а — АЧХ полосовых фильтров; б — результат фильтрации

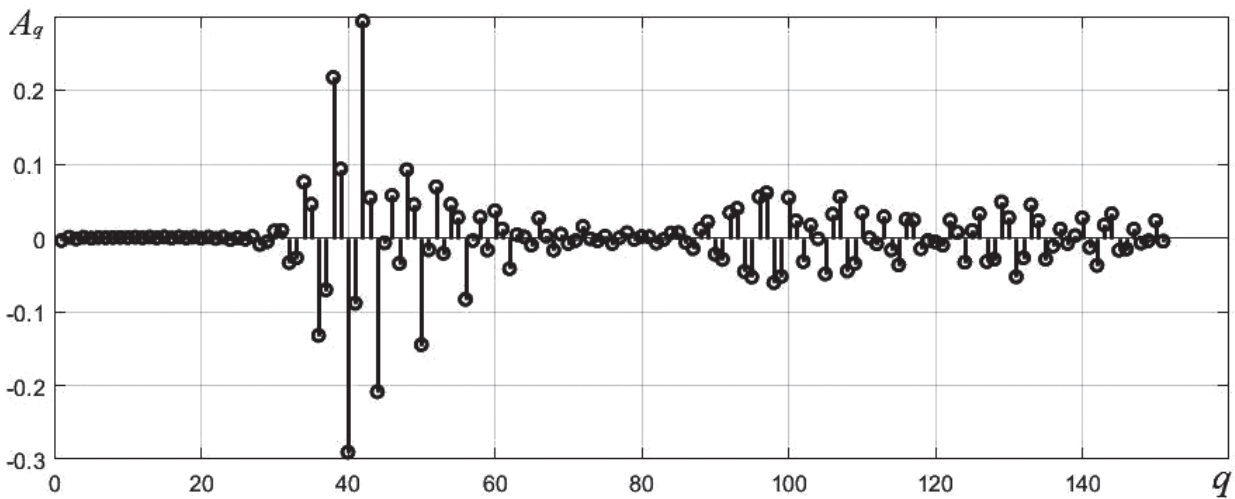


Рис. 5. Спектр эталона в пространстве ФГЭ

150 ФГЭ — относится к перекрытию тел качения по внутреннему кольцу. На данном базисе может быть сформирована ОФ. По сути ОФ — зеркально отображенная импульсная характеристика комплексного квазисогласованного фильтра [16]:

$$\dot{K}(f_n) = \sum_{q=0}^Q j^q \sqrt{\frac{\sqrt{\pi}}{q! 2^{q-1}}} \exp\left(-0,5(2^m)^2 f_n^2\right) H_q\left(2^m f_n\right),$$

где  $H_q$  — полиномы Эрмита;  $q$  — порядок ФГЭ ( $Q$  — наибольший порядок);  $m$  — параметр масштаба.

Таким образом, сконструированный квазисогласованный фильтр (в базе Фурье) имеет три характерных пика, которые соответствуют вышеизложенным особенностям спектра в базе ФГЭ (рис. 6). Также на рисунке представлен спектр исправного подшипника (см. рис. 2,а).

В свою очередь, ОФ описывает выделенный эталон (рис. 7) с ошибкой не более 1%. Эта точ-

ность может варьироваться за счет ошибки аппроксимации [13]. В данной работе такая процедура не осуществлялась, максимальный порядок  $Q$  составлял 150. Также стоит отметить, что в расчете коэффициента передачи квазисогласованного фильтра присутствует параметр масштаба, вариация которого способствует уточнению положения максимумов ВКФ, что увеличивает точ-

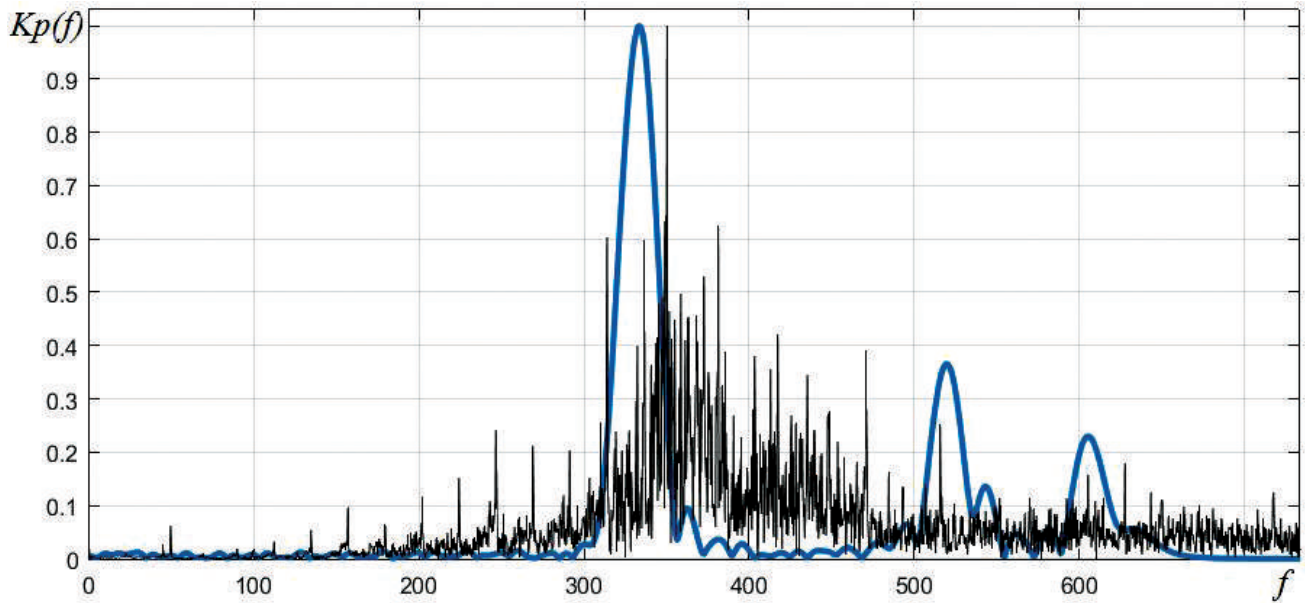


Рис. 6. Квазисогласованный фильтр

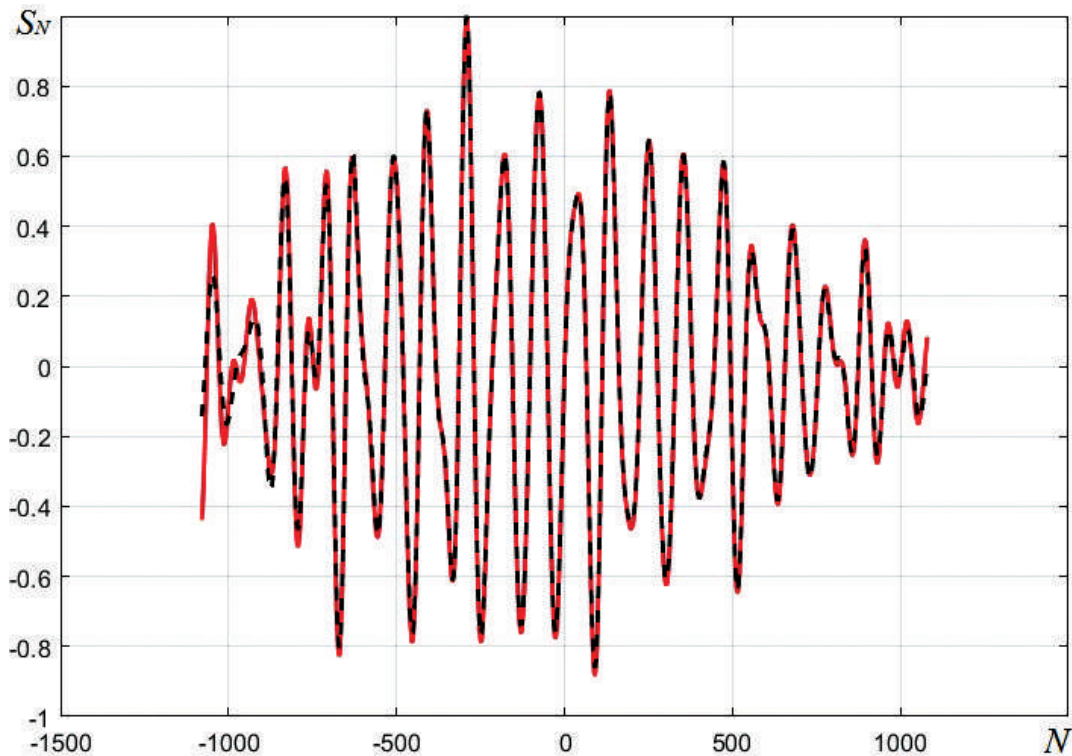


Рис. 7. Результат обработки: выделенный эталон (сплошная линия), опорная функция (штриховая линия)

ность построения ритмограммы и скаттерограммы. Такая процедура схожа с изменением параметра масштаба в вейвлет-преобразовании. Ключевым отличием двух подходов обработки является то, что на выходе рассматриваемого метода имеем взаимную корреляционную функцию, позволяющую оценить степень схожести опорного сигнала и эталона, а при вейвлет-обработке – спектральное распределение.

Далее осуществляем перемножение комплексно сопряженного коэффициента передачи квазисогласованного фильтра и спектра исследуемого сигнала. После обратного преобразования Фурье получим взаимную корреляционную функцию; фиксируя ее максимумы, можно построить

ритмограмму и скаттерограмму. Более подробно с процедурой построения ОФ можно ознакомиться в [17].

**Обработка ритмограмм**

Для построения ритмограммы ВКФ подвергалась пороговой обработке. Результаты обработки показаны на рис. 8.

При построении ритмограммы в качестве порога было принято минимальное положительное значение из набора максимумов ВКФ-сигнала  $S_1(t)$ .

Ритмограммы выглядят как случайный процесс со средним значением, которое приблизительно равно 0.06 с и дает оценку среднего периода обрабатываемых сигналов.

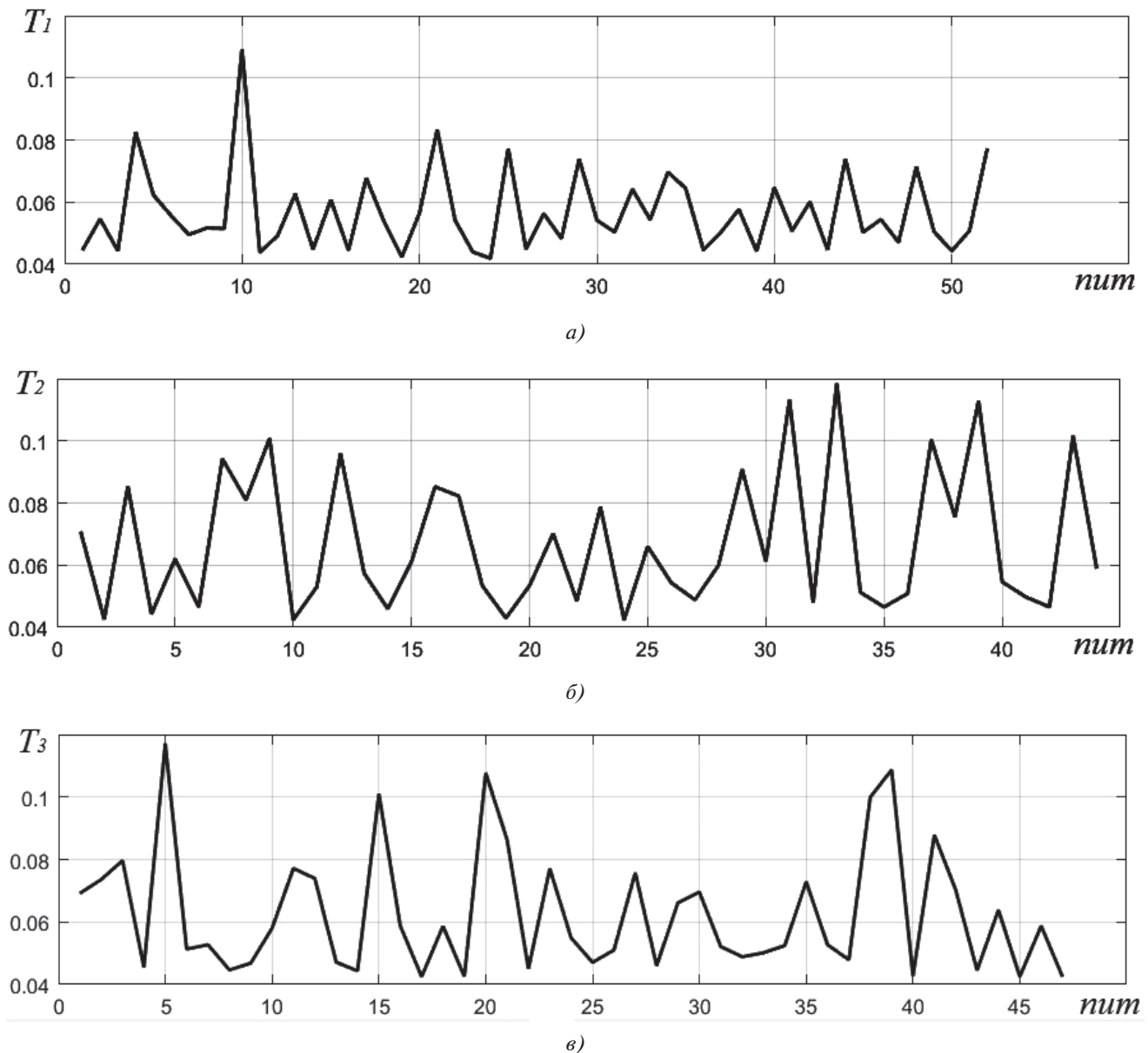


Рис. 8. Ритмограммы сигналов: num – номер максимума ВКФ;  $T_{1,2,3}$  – длительность интервалов между максимумами ВКФ



Выбросы ритмограммы свидетельствуют о увеличении (выбросы вверх) или уменьшении (выбросы вниз) параметров нелинейности вибрации. Выбросы вверх, соизмеримые со средним значением ритмограммы, свидетельствуют о пропуске алгоритмом такта, из-за того что максимум ВКФ не превышает установленного порога.

Ритмограмму можно рассматривать как дискретный сигнал, который подлежит обработке одним из традиционных методов. Можно, например, получить спектр ритмограммы. На рис. 9 представлены спектры ритмограмм.

В медицинской практике при диагностике патологий опираются на значение СКО [12]. Из таблицы видно, что значение СКО ритмограммы исправного подшипника более чем в полтора раза ниже, чем подшипников с дефектами. Это, в свою очередь, может быть дополнительным диагностическим признаком. Медиана записи сигнала имеет незначительное отклонение от численного значения математического ожидания, в то время как отклонение медианы от среднего значения у сигналов и выше. Приблизительно похожая картина наблюдается при анализе мод.

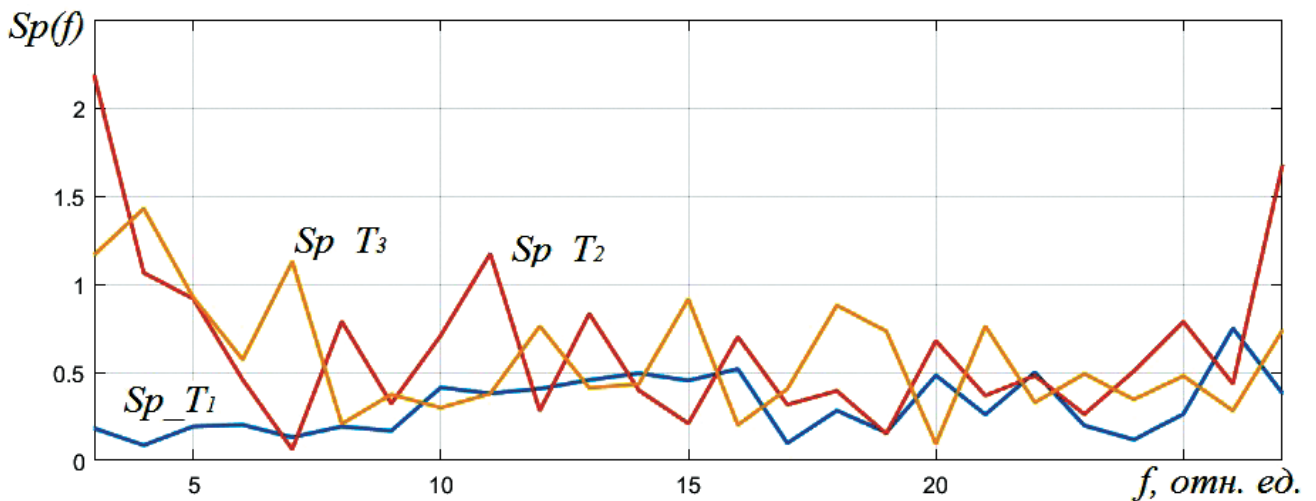


Рис. 9. Спектры ритмограмм: Sp\_T1 – спектр ритмограммы T1 или сигнала  $S_1(t)$ ; Sp\_T2 – спектр ритмограммы T2 или  $S_2(t)$ ; Sp\_T3 – спектр ритмограммы T3 или  $S_3(t)$

Как можно увидеть, спектр сигнала  $S_1(t)$  имеет отличие от спектров сигналов  $S_2(t)$  и  $S_3(t)$ , особенно в низкочастотной области. Для количественной оценки произведем статистический анализ ритмограмм. Вычислим математическое ожидание, СКО, моду и медиану, а также минимальное и максимальное значение. Рассчитанные параметры представлены в таблице.

Это свидетельствует о том, что распределение выбросов относительно среднего значения близко к симметричному у  $S_1(t)$ . Для сигналов  $S_2(t)$  и  $S_3(t)$  выбросы вниз (рывки, удары) преобладают. Далее рассмотрим скаттерограммы сигналов данных подшипников.

**Статистические параметры ритмограмм**

Параметр	Сигнал, мс		
	$S_1(t)$	$S_2(t)$	$S_3(t)$
Математическое ожидание	56.7	67.1	62.8
СКО	13.3	22.3	20.1
Медиана	54.0	59.4	54.9
Мода	50.4	46.5	42.5
Минимальное значение	41.9	42.4	42.5
Максимальное значение	109.2	118.5	117.1

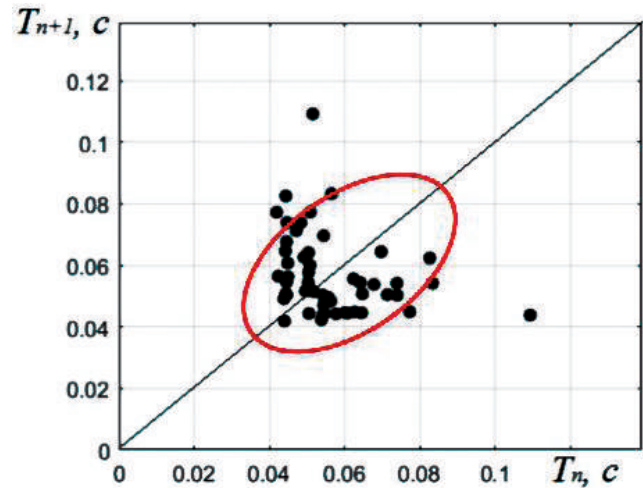
**Обработка скаттерограмм**

Как было сказано, скаттерограмма – это геометрический метод. На практике скаттерограмма имеет форму эллипса, вытянутого вдоль биссектрисы [18], рис. 10.

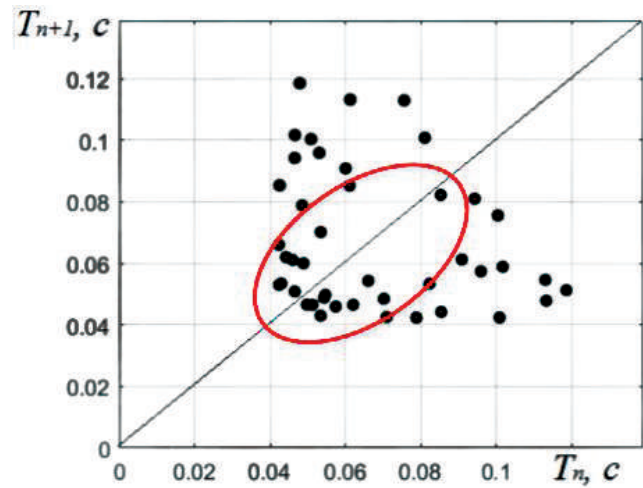
По скаттерограмме можно судить о квазипериодичности исследуемого сигнала. Представленные графики (рис. 10) и области точек называют корреляционной ритмограммой, что является топографическим эквивалентом пятен Пуанкаре [19]. Чем кучнее располагается точки, тем меньше квазипериодичность. Сдвиг точек вправо по оси координат отражает уменьшение ритма, сдвиг влево – увеличение. Если точки стоят далеко от целой совокупности, то это может свидетельствовать о возникновении дефекта.

**Выводы**

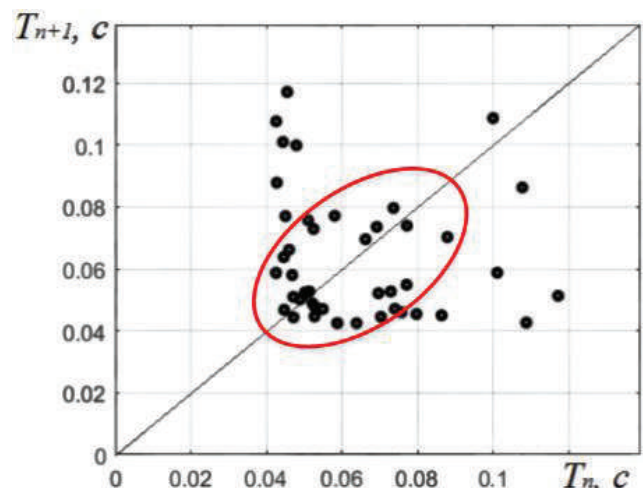
Ритмограмма и скаттерограмма позволяют исследовать систему в различных режимах, как штатных, так и специальных. Поэтому появляется возможность использовать дополнительную, а в некоторых случаях – практически единственную диагностическую информацию о состоянии динамической системы. Таким образом, данный способ диагностики представляет практический интерес для оценки характерных динамических признаков функционирования как авиационных ГТД, так и других различных механических систем. Конечно, ритмограмма и скаттерограмма будут иметь иной вид, если в качестве эталона выбрать другой фрагмент записи из-за изменения ОФ. Вопрос выбора эталона требует дополнительных исследований с привлечением в каждом конкретном случае специалистов по диагностике. Разработка баз разнообразных ОФ позволит осуществлять экспресс-диагностику устройств. Особенность предложенного и разработанного метода обработки квазипериодических импульсных сигналов с использованием функции Гаусса–Эрмита состоит также в возможности вариации масштаба ОФ по оси времени. Вариация масштаба позволяет выявить не только нарушения периодичности системы, но и изменение формы импульсов сигнала, что, в свою очередь, предоставляет дополнительные средства обнаружения и прогнозирования развития неисправности. В связи с активным развитием нейронных сетей, в том числе в области диагностики ГТД [20], набор ритмограмм и скаттерограмм может выступать в качестве обучающей выборки для диагностики и классификации неисправностей ГТД в авиационной промышленности.



a)



б)



в)

Рис. 10. Скаттерограммы сигналов:  $T_n, T_{n+1}$  – длительность предыдущего и последующего интервалов между максимумами ВКФ

## Список источников

1. *Fentaye A.D., Baheta A.T., Gilani S.I., 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, pp. 83. DOI: 10.3390/aerospace6070083
2. *Hanachi H.* Gas Turbine Engine Performance Estimation and Prediction. Thesis for PhD. — Ottawa, Ontario: Carleton University. 2015. — 133 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2931.2488
3. *Tang G., Pang B., Tian T., Zhou C.* Fault diagnosis of rolling bearings based on improved fast spectral correlation and optimized random forest // *Applied sciences*. 2018. Vol. 8. No. 10. DOI: 10.3390/app8101859
4. *Liu H., Wang X., Lu C.* Rolling bearing fault diagnosis under variable conditions using hilbert-huang transform and singular value decomposition // *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Special Issue. DOI: 10.1155/2014/765621
5. *Зубко А.И.* Перспективный комплекс виброакустической диагностики подшипниковых опор авиационных газотурбинных двигателей // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23. № 1. С. 47-55.
6. *Данилин А.И., Грецов А.А.* Анализ информационных особенностей сигнала доплеровского преобразователя динамических перемещений // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2016. Т. 15. №6. С. 170–177. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-170-177
7. *Данилин А.И., Жуков С.В., Попов М.С.* Математическое описание взаимодействия зондирующего СВЧ-сигнала с лопастями несущего винта вертолета // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2016. Т. 15. №3. С. 178–188. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-178-188
8. *Barkova N., Barkov A., Grishchenko D.* Vibration diagnostics of equipment units with gas turbine engines // *Vibroengineering PROCEDIA*. 2019. Vol. 25, pp. 89-94. DOI: 10.21595/vp.2019.20723
9. *Fabry S., Češkovič M.* Aircraft gas turbine engine vibration diagnostic // *Magazine of Aviation Development*. 2017. Vol. 5. No. 4, pp. 24-28. DOI: 10.14311/MAD.2017.04.04
10. *Шабает В.М., Казанцев А.С., Леонтьев М.К.* и др. Вибродиагностика повреждений подшипников качения при монтаже и сборке тяжелых роторных узлов // *Контроль. Диагностика*. 2007. № 11. С. 18-24.
11. *Sieciński S., Kostka P.S., Tkacz E.J.* Heart rate variability analysis on electrocardiograms, seismocardiograms and gyrocardiograms on healthy volunteers // *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 16, pp. 4522. DOI: 10.3390/s20164522
12. *Кулаичев А.П.* Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика: Учебное пособие. — М.: НИЦ ИНФРА-М, 2019. — 469 с.
13. *Балакин Д.А., Штыков В.В.* Диагностика циклических систем с помощью алгоритма, основанного на функциях Гаусса—Эрмита // *Цифровая обработка сигналов*. 2018. №3. С. 59-62.
14. *Martens J.-B.* The Hermite Transform — Theory // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*. 1990. Vol. 38. Issue 9, pp. 1595-1606. DOI: 10.1109/29.60086
15. *Семенова А.С., Зубко А.И.* Исследование технического состояния межроторного подшипника на вибродиагностическом стенде СП-180М после прохождения ресурсных испытаний // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 2. С. 126-138.
16. *Балакин Д.А., Штыков В.В.* Построение ортогонального банка фильтров на основе преобразований Эрмита для обработки сигналов // *Журнал радиоэлектроники*. 2014. № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/koi/sep14/1/text.pdf>
17. *Balakin D.A., Shtykov V.V.* Using rhythmograms to diagnose mechanical systems // *Journal of Physics: Conference Series*. APITECH-2019. Vol. 1399. Issue 4, pp. 044027. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044027
18. *Гаврилова Е.А.* Спорт, стресс, вариабельность: Монография. — М.: Спорт, 2015. — 168 с.
19. *Антипов О.И., Кисляк А.С.* Расчет фрактальной размерности скаттерограмм коротких R-R интервалов у пациентов с ишемической болезнью сердца // *Огарёв-Online*. 2016. № 15(80). URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/raschet-fraktalnoj-razmernosti-skatterogramm-korotkix-zapisej-r-r-intervalov-u-pacientov-s-ishemicheskoy-boleznyu-serdca>
20. *Loboda I.* Neural Networks for Gas Turbine Diagnosis // *Artificial Neural Networks — Models and Applications*. 2016. DOI: 10.5772/63107

## References

1. *Fentaye A.D., Baheta A.T., Gilani S.I., 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, p. 83. DOI: 10.3390/aerospace6070083
2. *Hanachi H.* *Gas Turbine Engine Performance Estimation and Prediction*. Thesis for PhD. Ottawa, Ontario, Carleton University, 2015, 133 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2931.2488
3. *Tang G., Pang B., Tian T., Zhou C.* Fault diagnosis of rolling bearings based on improved fast spectral correlation and optimized random forest. *Applied sciences*, 2018, vol. 8, no. 10. DOI: 10.3390/app8101859

4. Liu H., Wang X., Lu C. Rolling bearing fault diagnosis under variable conditions using hilbert-huang transform and singular value decomposition. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. Special Issue. DOI: 10.1155/2014/765621
5. Zubko A.I. Perspective vibroacoustics diagnostic complex for aircraft gas-turbine engines bearing assemblies. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 47-55.
6. Danilin A.I., Gretskov A.A. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2016, vol. 15, no. 6, pp. 170–177. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-170-177
7. Danilin A.I., Gretskov A.A. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2016, vol. 15, no. 6, pp. 178–188. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-178-188
8. Barkova N., Barkov A., Grishchenko D. Vibration diagnostics of equipment units with gas turbine engines. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2019, vol. 25, pp. 89-94. DOI: 10.21595/vp.2019.20723
9. Fabry S., Češkovič M. Aircraft gas turbine engine vibration diagnostic. *Magazine of Aviation Development*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 24-28. DOI: 10.14311/MAD.2017.04.04
10. Shabaev V.M., Kazantsev A.S., Leont'ev M.K. et al. *Kontrol'. Diagnostika*, 2007, no. 11, pp. 18-24.
11. Sיעיński S., Kostka P.S., Tkacz E.J. Heart rate variability analysis on electrocardiograms, seismocardiograms and gyrocardiograms on healthy volunteers. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 16, pp. 4522. DOI: 10.3390/s20164522
12. Kulaichev A.P. *Komp'yuternaya elektrofiziologiya i funktsional'naya diagnostika* (Computer electrophysiology and functional diagnostics), Moscow, NITs INFRA-M, 2019, 469 p.
13. Balakin D.A., Shtykov V.V. *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2018, no. 3, pp. 59-62.
14. Martens J-B. The Hermite Transform – Theory. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1990, vol. 38, issue 9, pp. 1595-1606. DOI: 10.1109/29.60086
15. Semenova A.S., Zubko A.I. Studying technical condition of the interrotor bearing with the SP180-M vibratory-diagnostic test bench after passing life tests. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 126-138.
16. Balakin D.A., Shtykov V.V. *Zhurnal radioelektroniki*, 2014, no. 9. URL: <http://jre.cplire.ru/koi/sep14/1/text.pdf>
17. Balakin D.A., Shtykov V.V. Using rhythmograms to diagnose mechanical systems. *Journal of Physics: Conference Series*. APITECH-2019, vol. 1399, issue 4, pp. 044027. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044027
18. Gavrilova E.A. *Sport, stress, variabel'nost'* (Sport, stress, variability), Moscow, Sport, 2015, 168 p.
19. Antipov O.I., Kislyar A.S. *Ogarev-Online*, 2016, no. 15(80). URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/raschet-fraktalnoj-razmernosti-skatterogramm-korotkix-zapisej-r-r-intervalov-u-pacientov-s-ishemicheskoy-boleznyu-serdca>
20. Loboda I. Neural Networks for Gas Turbine Diagnosis. *Artificial Neural Networks - Models and Applications*, 2016. DOI: 10.5772/63107

Статья поступила в редакцию 24.08.2021; одобрена после рецензирования 20.09.2021; принята к публикации 20.09.2021.

The article was submitted on 24.08.2021; approved after reviewing on 20.09.2021; accepted for publication on 20.09.2021.