

Monitoring the Precession of Gas Turbine Engines Rotor Systems and Evaluating the State of Inter-Rotor Bearings

**Okhtilev M. Yu., Khimenko V.I., Koromyslichenko V.N., Klucharev A.A.
Zubko A.I.**

St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. Evaluation of the technical condition of gas turbine units, widely used in power engineering, oil and gas industry and aviation, is an important and complex scientific and technical problem. One of the most important elements that has a significant impact on the quality and reliability of the gas turbine unit is its rotor system. Dynamic mechanical interaction between the rotors and inter-shaft bearing caused by counterphase motion of the mass centers of the rotors or the precession axes can lead to a sudden failures causing bearing breakage in the two-loop gas turbine engines. It has been assumed in the paper that sudden failures are caused by accumulated, total fatigue of the bearing material arising because of shock cyclic bearing loads due to the precession of the rotors. It has been shown that the technical condition could be evaluated using vibration monitoring the precessional motion of the rotors and constructing its trajectory in the normalized, using the fatigue curve of the material, phase plane. Using the new intellectual technology of automated estimation of control object state with use of concepts “programming without programming” and the level intersection theory, vibration curves and phase trajectories were analyzed to determine the characteristics of load cycles. This makes it possible to estimate the residual resource value of the inter-rotor bearing assembly. The proposed approach possesses essential scientific novelty to the estimation of the effect of vibrations on individual units and mechanisms of gas turbine systems and can be used for creating compact field-level devices.

Keywords: gas turbine engine, oscillations of rotors, vibration, damageability of structural parts, life.

DOI: 10.5281/zenodo.1217242

Monitorizarea precesiei sistemelor rotorice ale motoarelor cu turbine cu gaz și evaluarea stării rulmenților inter-rotori

Ohtilev M. Yu., Himenko V. I., Coromîslicenko V. N., Cliuciarev A. A., Zubco A. I.
Institutul de Informatică și Automatizare din St Petersburg al Academiei de Științe din Rusia
Universitatea Aerospațială de construcție a aparatelor de măsurare din St. Petersburg
Sankt-Petersburg, Federația Rusă

Rezumat. Se studiază caracteristicile monitorizării și evaluării dinamicii mișcării de precesie a sistemelor rotorice ale motoarelor cu turbine cu două rotoare și sunt prezentate posibilitățile de analiză și precizie a modificărilor prin afișarea informațiilor despre mișcarea de precesie pe planul de fază. Analiza imaginilor obținute ne permite să determinăm principalele caracteristici calitative sau geometrice ale funcțiilor care descriu traiectoria mișcării rotorului. Acest lucru face posibilă realizarea clasamentului mișcărilor precesionale și evaluarea valorilor forțelor care acționează în sistemul arborelui rulmentului rotorului, face posibilă realizarea unei însumări separate a ciclurilor individuale de sarcină a rulmentului cauzate de precesiunea arborelui rotorului și estimarea intensității acestora. Abordarea sugerată are o nouă științifică semnificativă și oferă posibilitatea determinării valorii duratei de viață reziduală a rulmentului interurban pe baza calculului valorilor încărcării acumulate, curbei de oboseală a materialului și a curbei de distrugere. Cu prelucrarea automată a datelor de monitorizare a vibrațiilor, tehnologiile de analiză parametrică inteligentă a spațiului caracteristic al obiectului de control au fost utilizate pe baza conceptului de programare fără programare. Principiile de bază ale algoritmilor de estimare propuse au fost testate experimental pe o machetă software de procesare a semnalelor de vibrații reale ale unui motor cu turbină cu gaz. În același timp, a fost implementat algoritmul de calcul al duratei de viață reziduală a suporturilor lagăruilor motoarelor cu turbine cu gaze în funcție de numărul specific de sarcini aplicate de diferite nivele. În viitor, ne așteptăm ca aplicarea rezultatelor acestui studiu să dezvolte soluții hardware la nivel de domeniu de aplicare.

Cuvinte-cheie: turbină cu gaz, oscilații ale rotoarelor, vibrații, deteriorarea pieselor structurale, durata de viață.

Мониторинг прецессии роторных систем газотурбинных двигателей и оценка состояния межроторных подшипников

Охтилев М.Ю., Хименко В.И., Коромысличенко В.Н., Ключарёв А.А. Зубко А.И.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской Академии Наук

Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются особенности мониторинга и оценки динамики прецессионного движения роторных систем двухроторных газотурбинных двигателей, показываются возможности анализа и прогнозирования её изменений с использованием отображения информации о прецессионном движении на фазовой плоскости. Анализ полученных изображений позволяет определить основные качественные или геометрические характеристики функций, описывающих траекторию движения ротора. Для оценивания количественных значений параметров динамики прецессионного движения применяется теория выбросов. Это дает возможность выполнить ранжирование прецессионных перемещений и оценку значений сил, действующих в системе вал ротора - подшипник, позволяет реализовать – раздельное суммирование единичных циклов нагрузки подшипника вызываемых прецессией вала ротора и оценить их интенсивность. Рассмотренный в данной работе подход позволяет оценивать число циклов нагрузки превышающих установленные по кривой усталости пороги количественные характеристики технического состояния подшипниковых опор роторных систем газотурбинных двигателей в зависимости от накопленной ударной нагрузки вызванной прецессией роторов низкого и высокого давления. Предлагаемый подход обладает существенной научной новизной и обеспечивает возможность определения величины остаточного ресурса межроторного подшипника на основе подсчета значений накопленной нагрузки, кривой усталости материала и графика повреждаемости. При автоматизированной обработке данных вибромониторинга использовались технологии интеллектуального параметрического анализа признакового пространства объекта контроля на основе концепции программирование без программирования. Основные принципы предлагаемых алгоритмов оценивания были проверены экспериментально на программном макете обработки реальных сигналов вибраций ГТД. При этом был реализован алгоритм подсчёта остаточного ресурса подшипниковых опор ГТД в зависимости от конкретного количества приложенных нагрузок различных уровней. В дальнейшем предполагается применение результатов данного исследования для разработки соответствующих аппаратных решений полевого уровня.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, колебания роторов, вибрации, повреждаемость деталей конструкции, ресурс.

Введение

Совершенствование технических средств и методов мониторинга, диагностики и прогноза технического состояния являются важным приоритетным направлением в области повышения безопасности современных авиационно-космических систем. Эффективность раннего обнаружения рисков состояний, предшествующих отказам базовых элементов авиационно-космических систем, представляется фундаментальным критериальным параметром методологии диагностики технического состояния исследуемых объектов [1, 2].

Однако, как показывает практика, при диагностировании технического состояния летательных аппаратов в условиях эксплуатации, зачастую трудно добиться «адресности» дефектов, в частности, в такой сложной динамической многокомпонентной системе, которой является авиационный газотурбинный двигатель (ГТД). Известные методы диагностики: инструментальный

контроль, математическое моделирование технического состояния ГТД, полунатурные испытания и прочие, не дают желаемого эффекта [1, 3, 7, 8, 9, 12].

Перспективы развития систем диагностирования авиационных ГТД связаны с разработкой новых методов и средств раннего предупреждения таких развивающихся неисправностей, которые в существующей системе технической эксплуатации приводят к накоплению усталости и затем – к внезапным отказам узлов ГТД. В этом смысле межроторные подшипники роторной системы – одни из важнейших элементов конструкции требующие постоянного контроля и диагностирования [4].

Универсальной прогнозной математической модели, обеспечивающей адресную оценку деградационных процессов технического состояния подшипниковых опор роторных систем ГТД в условиях эксплуатации, с высокой достоверностью прогноза и обладающих практической адекватностью, в настоящее время не создано. Это объясняется сложностью и индивидуальностью каждого

экземпляра ГТД как динамической системы, практически отсутствием представительных баз данных по параметрам вибраций, сложностью интерпретации результатов, практическими трудностями применения громоздких и не всегда адекватных, для эксплуатационных условий, математических моделей.

Методы диагностики прецессии ротора и межроторного подшипника основанные на результатах измерений вибрационных процессов на корпусах ГТД, соответствующих им пространства диагностических признаков и математических моделей, обеспечивающих достоверность и надёжность прогноза технического состояния роторных систем ГТД [5 – 7, 8, 10, 11, 16] носят, в основном, качественный характер или не применимы в условиях эксплуатации.

Цель данной работы – определение качественных и количественных характеристик пригодных для оценки величины остаточного ресурса межроторного подшипника в условиях эксплуатации с использованием данных мониторинга вибраций. Определения, по данным мониторинга вибраций, параметров динамики прецессионного движения роторов газотурбинного двигателя, вызывающих единичные циклы нагрузки, суммарного значения накопленных единичных циклов нагрузки и величины остаточного ресурса межроторного подшипника. Для этого предлагается использовать характеристики типа «пересечений уровней» или характеристики выбросов исследуемого процесса [13,14].

I. ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ

Колебания и нагрузки от ротора двигателя передаются на корпус (фюзеляж) летального аппарата через узлы крепления двигателя. От их конструкции, определяющей их жесткость и от параметров конструкции летального аппарата зависят условия работы интегральной системы роторы – корпус ГТД – летательный аппарат. Источниками вибраций ГТД служат динамические, механически связанные элементы конструкций, частотные характеристики которых известны [5 – 7, 9]. И в идеальном случае, частоты колебаний, генерируемые каждым элементом конструкции, в исправном и неисправном состоянии, могут быть практически выявлены. Однако, взаимодействие колебательных процессов

узлов друг с другом, переменные жёсткость и демпфирование подшипниковых опор, наличие мощного источника шумов в виде воздушного, неоднородного турбулентного потока, протекающего на высоких скоростях через турбины (газовоздушный тракт) ГТД и влияющего на каждый элемент конструкции, делает задачу измерения вибрационных характеристик не тривиальной.

При этом в ГТД технически затруднены возможности непосредственного измерения вибрационных параметров, все измерения как правило косвенные, проводимые, например, с использованием датчиков, установленных на наружном корпусе двигателя или элементах подшипниковых опор.

В условиях, когда адресный прогноз технического состояния существенно затруднён динамическим нестационарным и нелинейным характером взаимодействия элементов ГТД с окружающей средой и друг с другом, целесообразно выделить наиболее критичный (с точки зрения отказа) элемент или узел и произвести оценку суммарного (интегрального) воздействия на него силовых нагрузок со стороны ротора, определить суммарную повреждаемость и оценку остаточного ресурса узла.

Наличие большого количества собственных частот отдельных деталей и узлов всей системы приводит к возможному попаданию их в рабочий диапазон частот ГТД. Эти резонансы оказывают существенное влияние на динамическое поведение ротора и характер его перемещения в пространстве. Кроме резонансных явлений весьма существенным является взаимодействие между роторами, высокого и низкого давлений, и межроторным подшипником в случае противофазной прецессии роторов [10–12]. Резонансные взаимодействия могут быть устранены за счет соответствующих конструктивных решений [1, 10], тогда как прецессионные явления принципиально не устранимы. Значительный уровень амплитуд прецессий роторов, при возникновении противофазного их взаимодействия [5, 6, 9, 10 –12], вызывает появление повышенных динамических нагрузок в системе, что в первую очередь приводит к повреждению подшипников их опор.

При учете каждого из воздействующих факторов на техническое состояние ГТД при контроле прецессии ротора, облако возможных его состояний формируется хаотическими и

регулярными перемещениями центра масс ротора в пространстве, что затрудняет «адресную» оценку технического уровня его элементов со стороны внешней среды при экономически приемлемых критериях.

Одной из наиболее важных особенностей существующих систем вибродиагностики является то, что все они, как правило, относятся к классу «избирательных» систем и наиболее эффективно работают в условиях обнаружения какой-либо определенной группы дефектов.

Основные методы вибродиагностики и подавляющее количество выводов по техническому состоянию исследуемых объектов опираются на анализ качественных изменений спектрального состава вибросигналов и описательный, визуальный подход к диагностике. При этом, наглядно проявляется отсутствие количественных характеристик и критериев [3, 6 – 8, 11,12].

Решение задачи мониторинга и оценки технического состояния ГТД целесообразно рассматривать в двух плоскостях - при производственных испытаниях и при эксплуатации.

1. При производственных испытаниях: детальный анализ состояния на основе всеобъемлющего мониторинга, в том числе вибрационного, каждого элемента ГТД.

2. При эксплуатации: интегральный подход, когда определяются параметры оценки состояния до ближайшего отказа на основе вибромониторинга, при минимуме ручных измерительных операций.

Все задачи вибродиагностики, задачи обнаружения, классификации и распознавания, как правило, предполагают предварительный выбор и обоснование информативных признаков, отражающих основные свойства исследуемых процессов и состояний рассматриваемых объектов. С позиций общей теории распознавания образов на этих этапах выполняется переход от общего описания исследуемых процессов к рассмотрению пространства признаков. Последующая статистическая обработка этих признаков направлена на принятие и интерпретацию решений относительно текущего состояния диагностируемых объектов. Выбор информативных признаков существенно влияет на общую структуру, сложность и эффективность алгоритмов обработки и анализа экспериментальных данных. К сожалению, во многих реальных ситуациях

набор признаков определяется не тем, что нужно было бы измерить для решения конкретной задачи, а тем, что удастся измерить.

Межвальный (или межроторный) подшипник, при совместном влиянии прецессий роторов низкого и высокого давления может испытывать значительные ударные нагрузки, что существенно влияет на надежность работы ГТД [4, 8, 10, 11, 12]. Вид кривой траектории перемещения центра масс каждого из роторов определяет характер силового воздействия на подшипник, и при условии нормировки текущих и максимальных значений прецессионных колебаний возможен расчёт значений ударных нагрузок на подшипник. Интегральные оценки прецессии ротора, на основе вибромониторинга, целесообразнее всего получить, рассматривая орбиты вектора положения центра масс на фазовой плоскости [8, 14, 15].

Задачи представления и исследования случайных процессов на фазовой плоскости приводят к рассмотрению разнообразных структур фазовых траекторий. Для их описания, сравнения и общего анализа целесообразно иметь и количественные характеристики, отражающие особенности вероятностного поведения фазовых траекторий при различных моделях исследуемых процессов. В качестве таких характеристик принципиально могут быть использованы характеристики типа «пересечений уровней» или характеристики выбросов исследуемого процесса $\xi(t)$ на интервале времени $t \in [t_0, t_0 + T]$ в виде реализации двух случайных процессов: процесса $n(t)$, порожденного пересечениями уровня H и процесса $n_{ext}(t)$ экстремальных значений (рис. 1) [13,14].

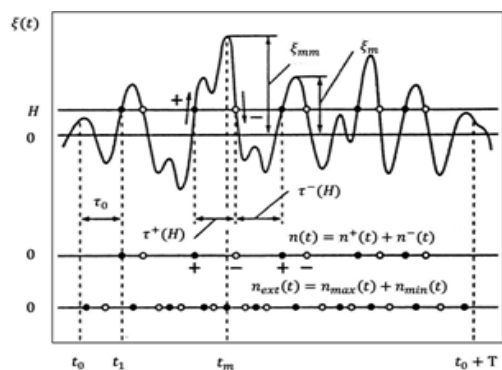
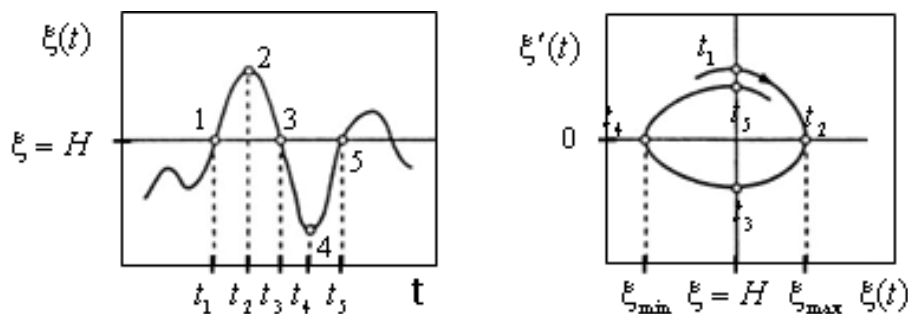


Рис. 1.а. Характеристики процессов пересечения уровней.

Таблица 1.

Наиболее распространенные характеристики выбросов

Число пересечений траекторией $\xi(t)$, $t \in T$ заданного уровня H (число выбросов)	$n(H, T), n^\pm(H, T)$
Число экстремальных значений траектории (число максимумов, минимумов)	$n_{ext}(T), n_{max}(T), n_{min}(T)$
Высота локальных максимумов	ξ_m
Высота абсолютного максимума – супремума	$\xi_{mm} = \xi_{sup}$
Время первого достижения заданной границы	τ_0
Относительная длительность пребывания траектории $\xi(t)$ в заданной области $\xi \geq H$ или $\xi \in [H_1, H_2]$	$t^+(H), t(H_1, H_2)$
Длительность выбросов траектории $\xi(t)$ на уровне H	$\tau^+(H), \tau^-(H)$
Длительность интервалов между последовательными максимумом и минимумом траектории	τ_{M-m}



- $t = t_1 \Rightarrow$ Положительное пересечение уровня $H \rightarrow \xi(t_1) = H, \xi'(t_1) > 0$
- $t = t_2 \Rightarrow$ Локальный максимум функции $\xi(t) \rightarrow \xi'(t_2) = 0, \xi''(t_2) < 0$
- $t = t_3 \Rightarrow$ Отрицательное пересечение уровня $H \rightarrow \xi(t_3) = H, \xi'(t_3) < 0$

Рис 1.6. Особые точки траектории случайного процесса и соответствующие им точки фазовой траектории.

Аналитическое определение многих характеристик выбросов (пересечений уровней, экстремальных значений) и числовые характеристики фазовых отображений связаны с поведением исследуемого случайного процесса и поведением его производных. Эти особенности хорошо согласуются с исследованиями вибрационных колебаний при экспериментальных измерениях перемещений, скорости и ускорения для информационных вибросигналов [8,11, 16].

Из общих свойств фазовой плоскости видно, что для фазовой траектории $L(\xi, \xi'; t)$ каждое пересечение координатных осей $-\xi \circ \xi$ и $-\xi' \circ \xi'$ на плоскости $(\xi \circ \xi')$ связано

с наличием определенного вида особой точки реализации $\xi(t)$, $t \in [t_0, t_0 + T]$ исследуемого процесса (рис. 2). В свою очередь, особые точки выборочных функций $\xi(t)$, $t \in [t_0, t_0 + T]$ позволяют описывать детальную вероятностную структуру процессов $\xi(t)$.

Следовательно, по аналогии с характеристиками выбросов для непрерывных случайных процессов $\xi(t)$, могут быть определены характеристики пересечений уровней в задачах анализа структуры фазовых траекторий $L(\xi, \xi'; t)$ на плоскости $(\xi \circ \xi')$.

Рассмотрим более подробно [13-16] характерные особенности поведения выборочной функции $\xi(t)$, $t \in [t_0, t_0 + T]$ некоторого непрерывного случайного процесса $\xi(t)$ и поведение соответствующей ей траектории $L(\xi, \xi'; t)$ на фазовой плоскости (ξ, ξ') . Несложно заметить (см рис.2), что при математическом ожидании процесса $m_\xi = M\{\xi(t)\} = 0$ фазовая траектория $L(\xi, \xi'; t)$ пересекает полуось $0\xi'$ в те моменты времени t_i , когда функция $\xi(t)$ пересекает нулевой уровень снизу вверх, т.е. в моменты появления положительного выброса процесса $\xi(t)$ над уровнем $H = m_\xi = 0$. На рис.2 эти пересечения обозначены точками 1 и 9. Если воспользоваться здесь результатами [14,15,16], то для среднего числа пересечений $N_L(0\xi', T)$ фазовой траекторией $L(\xi, \xi'; t)$ положительной полуоси $0\xi'$ на интервале времени $[t_0, t_0 + T]$ получим общую формулу:

$$N_L(0\xi', T) = N_\xi^+(0, T) = \int_{t_0}^{t_0+T} dt \int_0^\infty p(0, \xi'; t) d\xi' \quad (1)$$

где $p(0, \xi'; t) = p(\xi(t), \xi'(t))|_{\xi(t)=0}$ – совместная плотность вероятностей для значений $\xi(t)$ и $\xi'(t)$ при условии $\xi(t) = m_\xi = 0$

По аналогии с этим, среднее число пересечений $N_L(-\xi'0, T)$ фазовой траекторией $L(\xi, \xi'; t)$, $t \in [t_0, t_0 + T]$ полуоси $-\xi'0$ будет совпадать со средним числом отрицательных выбросов процесса $\xi(t)$ на уровне $H=0$ и для этой величины можно записать:

$$N_L(-\xi'0, T) = N_\xi^-(0, T) = - \int_{t_0}^{t_0+T} dt \int_{-\infty}^0 p(0, \xi'; t) d\xi' \quad (2)$$

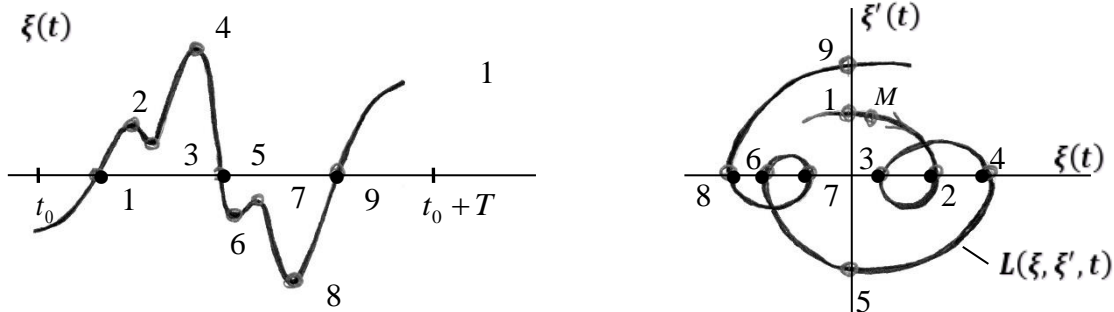


Рис 2.а. Представление случайных процессов $\xi(t)$ на фазовой плоскости

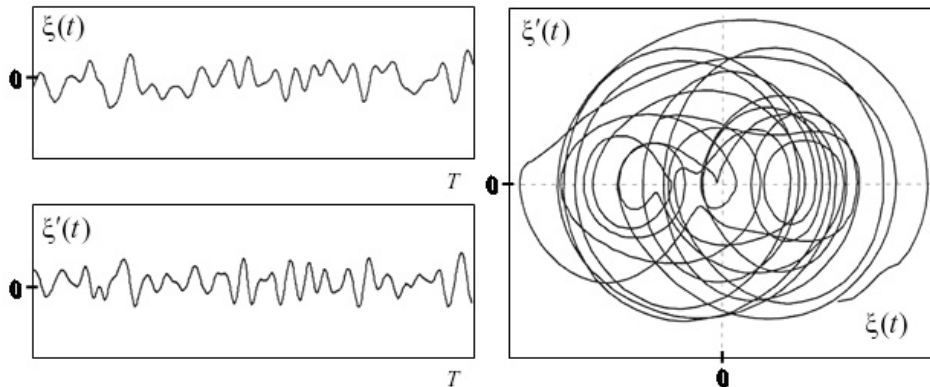


Рис. 2.б. Отдельная реализация $\xi(t)$, $t \in [t_0, t_0 + T]$ стационарного гауссовского процесса, особенности изменения её производной $\xi'(t)$ и структура фазовой траектории $L(\xi, \xi'; t)$.

Выходы реализации $\xi(t)$ за уровень $H = 0$ (точки 1 и 9) и входы $\xi(t)$ под уровень $H = 0$ (точка 5) приводят к переходу фазовой траектории $L(\xi, \xi'; t)$ из левой полуплоскости $\xi(t) < 0$ в правую полуплоскость $\xi(t) \geq 0$ и, соответственно, из правой полуплоскости в левую. При исследовании случайных процессов $\xi(t)$ такие переходы происходят с различной скоростью. На фазовой плоскости $L(\xi, \xi'; t)$ координаты точек 1, 5, 9 при $\xi(t) = 0$ дают наглядную информацию о значениях производной $\xi'(t)$ в моменты пересечения траекторией $L(\xi, \xi'; t)$ оси $-\xi' \circ \xi'$, т.е. непосредственно отображают скорость нарастания и положительных (точки 1, 9), и отрицательных (точка 5) выбросов процесса $\xi(t)$.

Общее поведение траектории $L(\xi, \xi'; t)$ в правой полуплоскости, при $\xi(t) \geq 0$ описывает характерные особенности положительных выбросов процесса $\xi(t)$ над уровнем $H = m_\xi = 0$. В левой полуплоскости, при $\xi(t) < 0$, структура фазовой траектории $L(\xi, \xi'; t)$ отражает особенности поведения отрицательных выбросов процесса $\xi(t)$.

Моменты пересечений фазовой траекторией $L(\xi, \xi'; t)$ оси абсцисс $-\xi \circ \xi$ связаны с моментами появления локальных экстремумов (максимумов и минимумов) выборочной функции $\xi(t)$. При этом общая структура фазовых траекторий (схема рис.2) показывает, что в моменты локальных максимумов реализации $\xi(t)$ изображающая точка M пересекает на фазовой плоскости $(\xi \circ \xi')$ ось абсцисс сверху вниз (точки 2, 4, 7), а в моменты локальных минимумов пересечение оси $-\xi \circ \xi$ происходит снизу вверх (точки 3, 6, 8). Нахождение среднего числа таких пересечений можно выполнить по общим формулам теории выбросов [13,14] для вычисления числа максимумов, минимумов и числа экстремальных значений случайного процесса.

Так, в частности, общее число пересечений оси абсцисс $-\xi \circ \xi$ с траекторией $L(\xi, \xi'; t)$ определяется общим

числом экстремальных значений реализации $\xi(t)$ на рассматриваемом интервале времени $[t_0, t_0 + T]$:

$$N_L(-\xi \circ \xi, T) = N_{Ext}(T) = \int_{t_0}^{t_0+T} dt \int_{-\infty}^{\infty} |\xi''| p(0, \xi''; t) d\xi'' \quad (3)$$

где $p(0, \xi''; t) = p(\xi', \xi''; t)|_{\xi'(t)=0}$ совместная плотность вероятности.

На схеме рис.2 наглядно показано, что среднее число экстремумов (3) может совпадать со средним числом выбросов лишь для наиболее простой структуры рассматриваемых процессов. Это выполняется, например, для фазовых траекторий $L(x, x'; t)$ гармонического колебания $x(t)$ и фазовых траекторий $L(\eta, \eta'; t)$ узкополосного процесса $\eta(t)$, когда каждый выброс сопровождается лишь одним экстремальным значением. Расширение спектрального состава исследуемых процессов $\xi(t)$ усложняет общую структуру выборочных функций, и на фазовых траекториях $L(\xi, \xi'; t)$ появляются дополнительные особые точки – дополнительные пересечения оси $-\xi \circ \xi$.

Если при описании рассматриваемых процессов $\xi(t)$ ввести отношение:

$$\frac{N_L(-\xi \circ \xi, T)}{N_L(-\xi' \circ \xi', T)} = \frac{N_{Ext}(T)}{N_\xi(0, T)} = k \quad (4)$$

то коэффициент k может быть использован в качестве удобной характеристики сложности для структуры фазовых траекторий $L(\xi, \xi'; t)$. По своему физическому смыслу такой коэффициент отражает среднее количество экстремальных значений, приходящихся на один положительный или отрицательный выброс функции $\xi(t)$.

В соответствии с результатами (1) – (3), коэффициент сложности (4) будет определяться общей формулой:

$$k = \frac{N_L(-\xi \circ \xi, T)}{N_L(-\xi' \circ \xi', T)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\xi''| p(0, \xi''; t) d\xi''}{\int_{-\infty}^{\infty} |\xi'| p(0, \xi'; t) d\xi'} \quad (5)$$

Для широкополосных случайных процессов $\xi(t)$, как правило, выполняется неравенство $N_{Ext}(T) \geq N_{\xi}(0, T)$, и значение коэффициента $k \geq 1$. При переходе к анализу простых гармонических колебаний величина $k = 1$.

Рассматривая общую структуру фазовых траекторий $L(\xi, \xi'; t)$, можно дополнительно определить вероятность нахождения и среднюю длительность нахождения траектории $L(\xi, \xi'; t)$ в правой полуплоскости:

$$P\{L(\xi, \xi'; t) \in [\xi(t) = 0]\} = P\{\xi(t) = 0\} = \int_0^{\infty} p_{\xi}(\xi; t) d\xi$$

$$T_L^+(0) = T P\{\xi(t) \geq 0\} = T \int_0^{\infty} p_{\xi}(\xi; t) d\xi \quad (6)$$

где $T_L^+(0)$ длительность, а $P\{\xi(t) \geq 0\}$ вероятность нахождения траектории $L(\xi, \xi'; t)$ в правой полуплоскости.

Эти результаты с учетом формул (1) и (2) позволяют найти среднюю длительность положительных выбросов $\bar{\tau}_L^+(0)$ и среднюю длительность отрицательных выбросов $\bar{\tau}_L^-(0)$ фазовой траектории $L(\xi, \xi'; t)$ на уровне $\xi(t) = m_{\xi} = 0$:

$$\bar{\tau}_L^+(0) = \int_0^{\infty} p_{\xi}(\xi; t) d\xi / N_{\xi}^+(0, 1) \quad (7)$$

$$\bar{\tau}_L^-(0) = \left[1 - \int_0^{\infty} p_{\xi}(\xi; t) d\xi \right] / N_{\xi}^-(0, 1)$$

Приведенные выше результаты показывают возможность вероятностного анализа детальной структуры непрерывных случайных процессов на основе их фазовых траекторий. Рассмотренные при этом числовые характеристики (1) – (7) являются достаточно общими, они непосредственно связаны с характеристиками выбросов (рис.1), [13,14]) и позволяют описать не

только качественные изменения структуры, но и выполнить количественное описание процессов $\xi(t)$ при отображении их на фазовой плоскости (ξ, ξ') .

В качестве ещё одного полезного обобщения целесообразно выделить класс задач по исследованию характеристик выбросов векторных случайных процессов [16]. В этом случае плоскость (ξ_1, ξ_2) перемещения конца вектора является фазовым пространством (фазовой плоскостью) двумерного векторного процесса $\xi(t)$.

Изменение значений вектора $\xi(t)$ описываются движением фазовой точки $(\xi_1(t), \xi_2(t))$ по кривой фазовой траектории на плоскости (ξ_1, ξ_2) . Другими словами, используя взаимно ортогональные показания датчиков вибрации, установленных на корпусе ГТД, можно построить кривую перемещения центра масс, характеризующую прецессию ротора [8].

Для многих реальных объектов редко удается составить полный перечень информативных признаков, которые давали бы описание всех свойств этих объектов. Более того, выбор признаков существенно зависит от содержания решаемой задачи, априорных данных относительно решаемых объектов и необходимой детальности исследований. Задачи выбора информативных признаков трудно поддаются формализации, они решаются, как правило, на основе накопленных статистических данных и эвристических методов анализа применительно к каждой конкретной предметной области [17].

Проведенные исследования [10-12] диагностических моделей роторов низкого и высокого давлений (РНД, РВД) показывают, что характер прецессии определяет взаимодействие ротора НД с ротором ВД и их совместным влиянием на межроторный подшипник. Характерной чертой этого взаимодействия является возникновение ударных нагрузок на подшипник [11].

Ещё одним существенным параметром характеризующем возникновение ударных нагрузок, в следствии износа тел качения в подшипниках и увеличение рабочего зазора является появление импульсов на частотах, определяемых величиной рабочего зазора и

геометрией подшипника и кратных роторной частоте (коэффициент кратности как правило действительное число). Указанные колебания проявляются как группа импульсов, число которых определяется числом взаимодействующих тел качения с беговой дорожкой кольца подшипника (от 1 до n , где n число тел качения в подшипнике) [12].

В рассмотренной диагностической модели параметрами (диагностическими), оцениваемыми в процессе контроля технического состояния могут быть: частоты вращения роторов НД и ВД, значения виброскорости и виброперемещений, оцениваемых по осям X и Y на опорах подшипников, значения виброскорости на частотах, предположительно связанных с рабочим зазором в диагностируемом подшипнике. Указанный ансамбль параметров эффективно может быть оценён на основе теории пересечений уровней [18].

На основании большого количества проведенных исследований можно предположить, что питтинг на рабочих поверхностях подшипников опор роторов

формируется в зависимости от количества соударений, по амплитуде превышающих критическую величину. Этот процесс развивается в зависимости от внешних условий - в случае небольших единичных критических превышений нагрузки возникают отдельные повреждения, которые суммируются в случаях последующих превышений критических значений нагрузки. Если количество таких режимов, за определённое время работы двигателя, не превышает значений ударной нагрузки, вызывающей начало прогрессирующего развития питтинга, то роста вибрации не происходит. Если же происходит превышение критической суммы ударных нагрузок – начинается активное развитие процессов усталостного повреждения рабочих поверхностей деталей подшипника и существенный рост его вибрации.

Зная суммарную величину приложенных сил и интенсивность соударений по кривой усталости материала [1] (рис.3) можно составить прогноз количества циклов работы подшипника.



Рис. 3. Кривая усталости материала.

Критическое значение суммы единичных воздействий зависит от накапливаемой величины суммарных нагрузок. Так как единичные превышения критического

значения нагрузок для возникновения питтинга присутствуют на всех ГТД, выдвинуто предположение, что питтинг в начальных стадиях может присутствовать на

всех подшипниках, работавших в составе опор ГТД, так как для этого на всех двигателях существуют потенциальные условия.

На основе данных, полученных при измерении виброперемещений или построении орбитальной траектории

перемещения центра масс ротора на фазовой поверхности, определяются значения сил возникающих в системе и превышающих контрольные уровни, и число соударений элементов подшипников с рабочей поверхностью подшипника (см. рис.4).

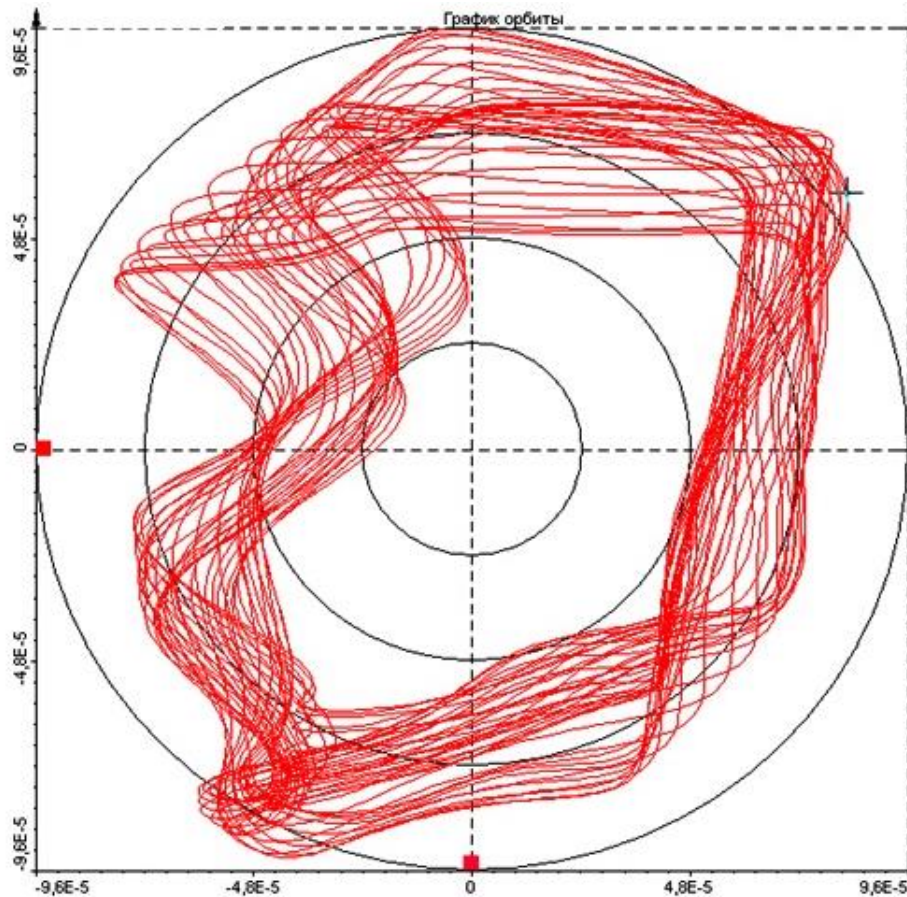


Рис. 4. Фазовая траектория при развитой прецессии ротора ГТД.

Для проведения предварительного прогноза, в упрощенной математической модели, можно предположить, что зависимость напряжения в подшипнике от суммарной цикловой нагрузки имеет близкий к линейному закону характер [19] и кривая повреждаемости имеет вид, представленный на рис.5. Зная суммарную величину приложенных сил и интенсивность соударений по предполагаемой кривой повреждаемости можно составить прогноз длительности жизненного цикла межроторного подшипника.

В связи с этим целесообразно, на первом шаге, получить информацию о реальных значениях прецессии. Далее следует определить значения нагрузок и задать сетку

уровней, превышение которых вызывает единичные повреждаемости. Определив единичную повреждаемость, в итоге можно определить суммарную повреждаемость за отработанный период и по ее остатку составить прогноз, который будет постоянно уточняться в зависимости от интенсивности прикладываемых к подшипнику нагрузок.

Затем, при работе двигателя контролируется изменения динамических характеристик роторных систем, выполняется подсчет в автоматическом режиме количества пересечений соответствующих уровней и определяется суммарная повреждаемость подшипников.

На рисунке «б а» и «б б» представлены графики орбит фазовых траекторий роторов и

результатирующие кривые суммарных циклов нагрузки, усталости материала и повреждаемости, полученные при анализе реального вибросигнала ГТД. Из хода кривых видно, процент выработки ресурса контролируемого подшипника приближается к 45%.

Программный комплекс для автоматизированной обработки данных вибромониторинга разработан по технологии интеллектуального параметрического анализа признаков пространства объекта контроля на основе концепции программирования без программирования, предложенной в [2].

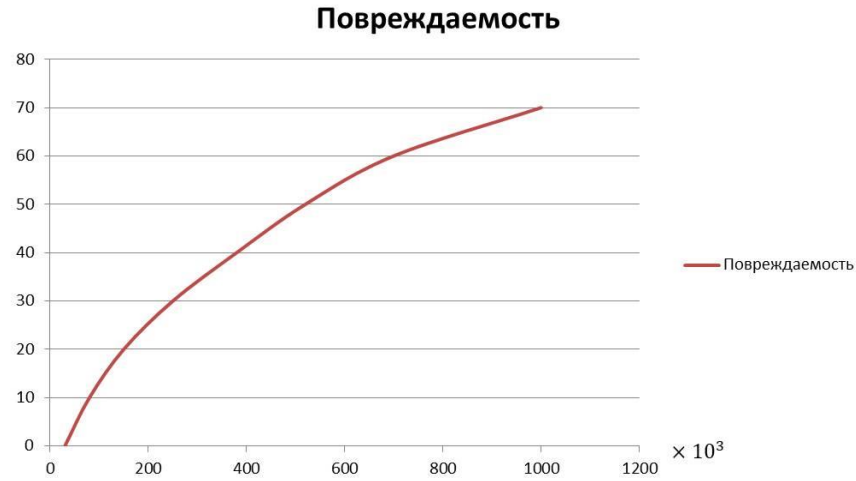


Рис.5. Предполагаемое изменение повреждаемости деталей подшипника в зависимости от числа циклов нагрузки.

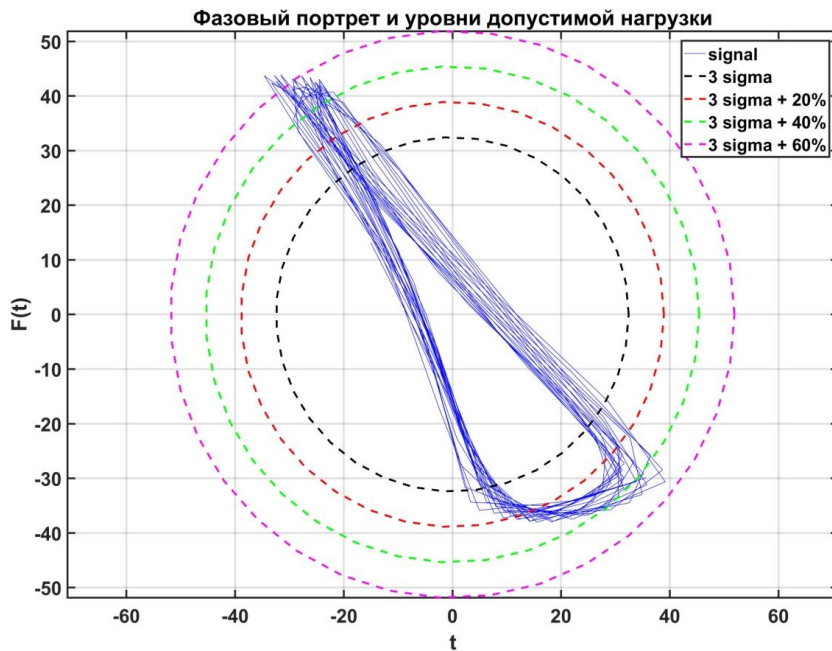


Рис.6 а. Траектории прецессии ротора, полученные при анализе реального вибросигнала ГТД на программном макете.

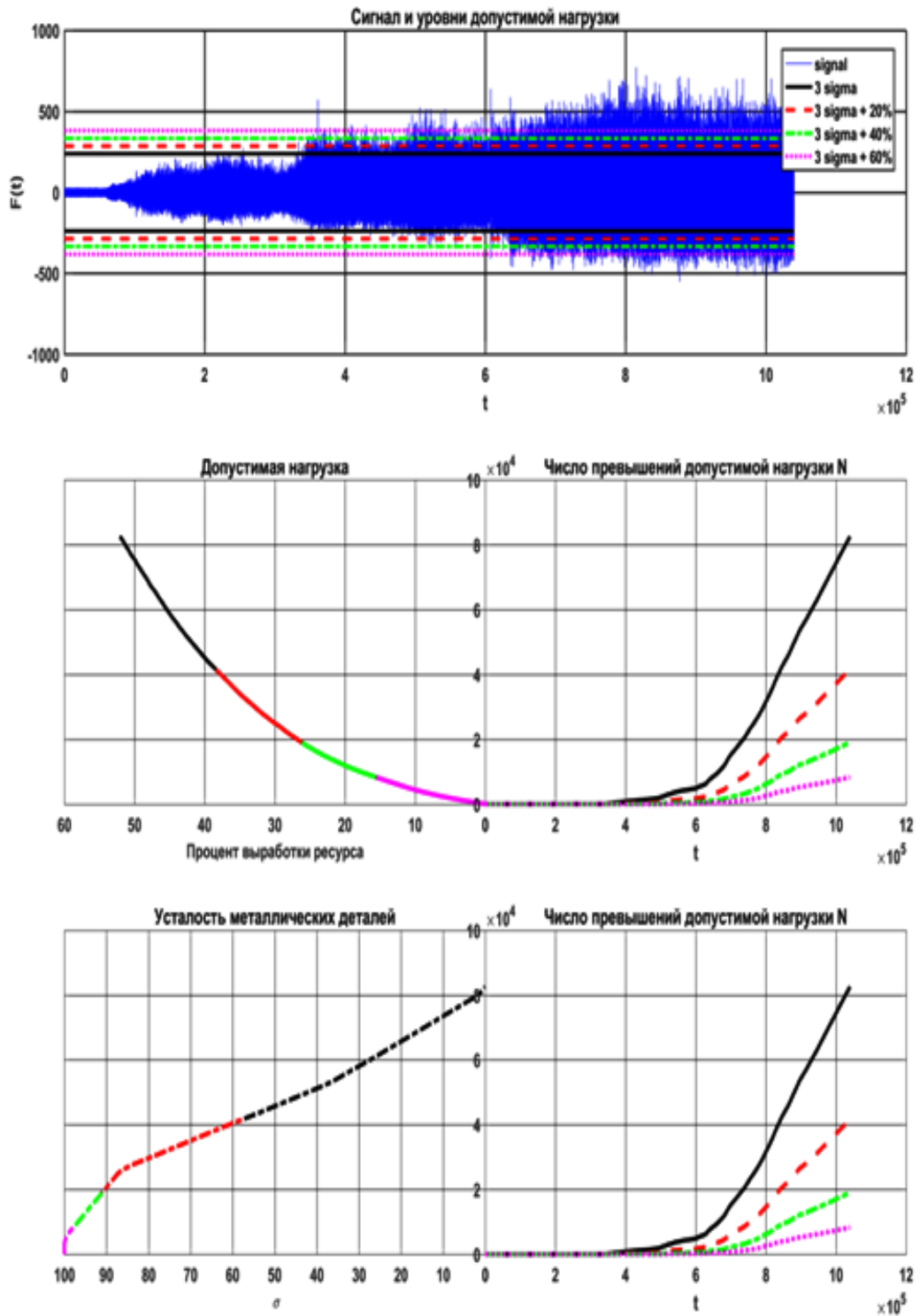


Рис.6 б. Результаты анализа реального вибросигнала ГТД на программном макете.

Заключение

Одним из важных критичных узлов ГТД является межроторный подшипник.

Выдвинуто предположение, что питтинг в начальных стадиях может присутствовать на всех подшипниках, работавших в составе опор ГТД, так как для этого на всех двигателях существуют потенциальные условия, формируемые взаимодействием процессов перемещения центров масс осей роторов (прецессия роторов) и подшипником.

Для получения интегральных оценок прецессии ротора, на основе вибромониторинга, целесообразнее всего рассматривать орбиты вектора положения центра масс ротора на фазовой плоскости.

Число циклов единичной нагрузки и их влияние на межроторный подшипник можно определить по нормированной фазовой траектории движения центра масс роторов с использованием характеристик теории пересечения уровней и кривой усталости материала.

Рассмотренный в данной работе подход позволяет оценивать число циклов нагрузки превышающих установленные по кривой усталости пороги количественные характеристики технического состояния подшипниковых опор роторных систем ГТД в зависимости от накопленной ударной нагрузки вызванной прецессией роторов низкого и высокого давления. Основные принципы предлагаемых алгоритмов оценивания были проверены экспериментально на программном макете обработки реальных сигналов вибраций ГТД. При этом был реализован алгоритм подсчёта остаточного ресурса подшипниковых опор ГТД в зависимости от конкретного количества приложенных нагрузок различных уровней.

В дальнейшем предполагается применение результатов данного исследования для разработки соответствующих аппаратных решений полевого уровня.

Литература (References)

[1] Bently D.E., Hatch C.T. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics.–Bently Pressurized Bearing Press, 2002, 726 p.

- [2] Okhtilev M.U., Sokolov B.V., Usupov R.M. *Intelektualnye tekhnologii monitoringa I upravlenia strukturnoy dinamikoy slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov* [Smart technologies for monitoring and managing the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, Science Publ., 2006. 410p.
- [3] Mann N.R., Schafer R.E. Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data. – N.Y.: John Wiley, 1994, 336 p.
- [4] Hammer M., Kutalek D., Vibration Diagnostics of Rolling Bearings using the Time; Series Analysis Brno, Czech Republic SCIENCE JOURNAL, 2015, p 717-721
- [5] Moan T. Shinozuka M. Structural Safety and Reliability. – N.Y.: Elsevier, 1991, 282 p.
- [6] Graupe D. Identification of Systems.– N.Y.: Krieger R. Publishing Company, 1979, 304 p.
- [7] Stanislav Fabry, Marek Ceskovic, Aircraft Gas Turbine Engine Vibration Diagnostic.-Magazine of Aviation Development.– 5(4):24-28, 2017
- [8] Goldman P., Muszynska A. Application of Full Spectrum to Rotating Machinery Diagnostics // Orbit, Vol. 20, № 1, 1999, pp. 17 – 21.
- [9] B. Djaidir, A. Hafaifa, A. Kouzou .– Faults Detection In Gas Turbine Rotor Using Vibrations Analysis Under Varying Condition, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 55, 2, 393-406, Warsaw 2017
- [10] Nazarenko B.U., Svetashova L.F. *Problemy nadyozhnosti mezhrotornogo podshipnika pri dinamicheskom vzaimodejii rоторov dvukhval'nykh turboreaktivnykh dvigateley* [Problems of reliability between the inter-rotor bearing in the dynamic interaction of the rotors of two-shaft turbojet engines]. *Dvigatel'*, 2010, no.3(69), p.32
- [11] Nazarenko B.U., Svetashova L.F. *Diagnostika rоторov I mezhrotornogo podshypnika po vibroskorostyam na korpusakh dvukhval'nykh reaktivnykh dvigatelei* [Diagnostics of rotors and inter-rotor bearings by vibrating speeds on twin-shaft jet engines]. *Avia-kosmicheskaya tehnika I tehnologiya*. 2009, no.9 (66). pp.172-175
- [12] Haifei Wang, Junjie Gong, Guo Chen, Characteristics analysis of aero-engine whole vibration response with rolling bearing radial clearance.- *Jornal of Mechanical Science and Technology*.- may 2017, Volume 31, pp 2129–2141
- [13] Tikhonov V.I., Khimenko V.I. Excursions of the Trajectories of Random Processes. Nauka, Moscow, 1987.- 304p.
- [14] Tikhonov V.I., Khimenko V.I. Level-Crossing Problems for Stochastic Processes in Physics and Radio Engineering: An Overview // *Journal*

- of Communications Technology and Electronics, Vol.43, No. 5, 1998, pp. 501 – 523.
- [15] Sprott J.C. *Elegant Chaos: Algebraically Simple Chaotic Flows.*– Singapore: World Scientific Publishing, 2010.– 328 p.
- [16] P.H. Wirsching, T.L. Paez, K. Ortiz, *Random Vibrations: Theory and Practice/* Dever Publ. INC, Mineola, N.Y., 2006.
- [17] Khimenko V.I., Okhtilev M.U., Klyucharev A.A., Mat'yash V.A. *Analiz informativnykh priznakov v zadachakh obrabotki dannykh aerokosmicheskogo monitoringa* [Analysis of informative features in the tasks of processing aerospace monitoring data]. *Informatsionno-upravlyayushchiesistemy*, 2017, no.2, p.2–12
- [18] Kargin V. A., Skorokhodov Y. A., Nikolaev D. A., Shovkalyuk A. P. *Algoritmy otsenivaniya veroyatnostnykh kharakteristik informatsionnykh protsessov po statistkam prevysheniya urovnei* [Algorithms for estimating of information processes probability characteristics on statistics of the exceedances above the given levels]. *TRUDY MAI*. 2015. no.84
- [19] Haan L., Ferreira A. *Extreme Value Theory: An Introduction.* – N.Y.: Springer, 2006, 280 p..

Сведения об авторах.



Охтилев Михаил Юрьевич – д.т.н., профессор. Область научных интересов: системная поддержка принятия решений, теория программирования, теория алгоритмов реального времени, математическая логика, математическая лингвистика, системы искусственного интеллекта.
E – mail: oxt@mail.ru



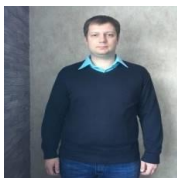
Хименко Виталий Иванович – д.т.н., профессор. Область научных интересов: прикладная теория случайных процессов, системный анализ, обработка информации в системах живой и неживой природы.
E – mail: yih.13@yandex.ru



Коромышличенко Владислав Николаевич – к.т.н., доцент. Область научных интересов: мониторинг и анализ технического состояния сложных организационно-технических объектов, инфотелекоммуникационные системы, прецизионные системы измерения и контроля параметров объектов, программная инженерия
E – mail: Koromislichenko@petrocometa.ru



Ключарёв Александр Анатольевич – к.т.н., доцент. Область научных интересов: прикладная теория случайных процессов, системы экспресс-анализа экспериментальных данных в реальном масштабе времени, микропроцессорные системы реального времени.
E – mail: ak@aanet.ru



Зубко Алексей Игоревич, аспирант ФГБОУ высшего образования «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: конструирование ГТД, техническая диагностика, вибродиагностика.
E – mail: zbk2@yandex.ru