

УДК 629.735.45:621.833(031)

А. Б. ЕДИНОВИЧ, А. В. ПАПЧЁНКОВ, А. В. КОЛОКОЛОВ

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ РЕДУКТОРОВ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Основные причины возникновения вибраций и методы обработки данных. Анализ результатов теоретических исследований, позволяет сделать заключение, что, в частности, сигнал датчиков вибраций нельзя считать стационарным даже в широком смысле, в связи с этим, параметр частоты дискретизации нестационарных сигналов не определяется по критерию Котельникова и требует проведения дополнительных исследований в рамках поставленной задачи.

Ключевые слова: Диагностирование ресурса деталей, сигналы вибраций, методы обработки данных, критерий Котельникова, нестационарность сигналов.

Основні причини виникнення вібрацій та методи обробки даних. Аналіз результатів теоретичних досліджень, дозволяє зробити висновок, що, у частоті, сигнал датчиків вібрацій не дозволяє вважати стаціонарним навіть у широкому сенсі, в зв'язку з цим параметр частоти дискретизації нестационарних сигналів не визначаються за критерієм Котельникова і потребує проведення додаткових досліджень у рамках поставленої задачі.

Ключові слова: Діагностування ресурсу деталей, сигнали вібрації, методи обробки даних, критерій Котельникова, нестационарність сигналів.

Main questions of modern theory and practice diagnostics for reduction gears parts of aviation gas turbine engines. Solving the ones eventually dramatically increase parts lifetime depending of. Analysis of theoretical researches allows make a conclusion the oscillation sensors signal consider steady-state not correct even in wide extent. That is why sampling frequency parameter of not steady-state signals do not determine according to Kotelnikov criterion and required additional researches in the frame of given task.

Keywords: lifetime part diagnostic, vibration signal, signal processing methods, Kotelnikov criterion, not steady-state signals.

Введение. Постановка задачи. Идея диагностирования, а позже и принцип объектной ориентированности аппаратного и программного состава систем диагностирования, закладывались в основу всех стендовых комплексов приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) ГТД. Сложнейший процесс испытаний ГТД способствовал тому, чтобы еще более 30 лет назад встал вопрос [1] о разработке методических основ и создании технических средств стендового диагностирования параметров двигателей в объеме ПСИ. Для этого существовало множество побудительных мотивов. Среди них – экстремальный характер технических требований, предъявляемых к создаваемой технике, при частом радикальном их повышении.

В мире известны лишь единичные попытки создания систем технического диагностирования, которые можно было бы отнести к категории объектно-ориентированных. В тех из них, в которых системы доводились до приемлемой кондиции, была подтверждена их существенно более высокая эффективность по сравнению с представленными на рынке универсальными, так называемыми, системами диагностического мониторинга. Эффективность объектно-ориентированных систем базировалась на принципах поддетальной динамической адаптации математических моделей к физическим процессам, приводящим к изменению ресурса деталей и узлов. Современное состояние стендовых комплексов ПСИ ГТД, которые разрабатывались на базе традиционных универсальных методов анализа, не соответствует возрастающим тактико-техническим требованиям.

Таким образом, является актуальной научно-технической задачей совершенствования традиционных математических моделей и методов диагностирования ресурса деталей редукторов ГТД, решение которой позволит повысить эффективность объектно-ориентированных систем при проведении ПСИ и ресурсных испытаний ГТД.

Основная часть. Объектно-ориентированная стендовая система диагностики вибраций редуктора в процессе испытаний ГТД предназначена для решения следующих задач:

- измерения уровня вибрации (УВ) на корпусах редукторов в реальном масштабе времени;
- оценки максимальных значений УВ в части соответствия нормам и требованиям ГОСТ 52526-2006 [2];
- оценки текущих значений УВ, сортировку их по принадлежности к деталям редуктора, запись в рабочую базу данных;
- оценки скорости и ускорения изменений УВ деталей редуктора;
- вероятностного расчета ресурса редуктора;
- расчёта параметров постепенного отказа деталей редуктора в соответствии с ГОСТ 27310-95 [3] и прогнозирования скорости выработки ресурсных показателей в процессе эксплуатации на основе данных полученных при стендовых ресурсных испытаниях, что вполне вписывается в концепцию эксплуатации ГТД по техническому состоянию.

Состояние вопроса. Источники вибраций [4–8].

В процессе передачи мощности двигателя от входного вала редуктора к выходному происходят её потери.

Потери мощности первой категории:

- трение: преобразуется в градиент температуры, мощность потерь выводится системой смазки;
- удары: преобразуется в энергию ударной волны, часть её преобразуется в градиент температуры, часть проходит до корпуса редуктора и преобразовывается датчиком в импульс пирозлектрического эффекта;
- вращательное движение несбалансированных центров масс деталей [4, 7];
- гидравлические потери на перемешивание и перемещение смазывающих масел внутри полости редуктора.

В первом приближении сигналы УВ первичных источников линейны, подчиняются закону суперпозиции и детально рассмотрены в научной [1], нормативной [8] и справочной [4] литературе.

Потери мощности второй категории:

Упругие деформации деталей редуктора эти источники инициируют сигналы акустической эмиссии [8] и нелинейные процессы в первичных источниках, которые приводят к возникновению стохастических

гармонических составляющих первичных сигналов и "размытию" их спектров.

Потери мощности третьей категории:

Технологические кинематические погрешности изготовления профилей деталей и их деформации под нагрузкой [4], которые инициируют нелинейности преобразований сигналов первичных и вторичных источников, а также инфрачастотные колебания корпуса изделия (ниже 10 Гц).

Устройства и методы обработки параметров энергии сигналов УВ по ГОСТ 10816-4-2002 [6] и ГОСТ ИСО 7919-1-2002 [7]. Из всей существующей номенклатуры датчиков вибраций [5] наиболее эффективны в эксплуатационном режиме приборы, работающие на основе пьезоэлектрического эффекта. Однако они имеют следующие (недостатки) основные особенности:

- высокая стоимость при изготовлении чувствительного элемента из природных кристаллов;
- чувствительность (пирозлектрический эффект) к ударным нагрузкам с малым временем фронта импульса, после которого могут измениться параметры датчика, вплоть до полной неработоспособности;
- чувствительность к электромагнитным и акустическим полям, которые должны быть учтены на этапе технического проекта;
- чувствительность к температурному воздействию (нагреву);
- влияние на характер и уровень сигнала места установки датчика.

Первичные аналого-цифровые преобразователи. В качестве основного метода преобразования применяется импульсно – кодовая модуляция. Параметры преобразователей рассчитываются исходя из точности квантования динамического диапазона датчиков и максимальной гармоники зубцовой частоты по критерию В.А. Котельникова, что приводит к погрешностям расчётов спектра для анализируемых нестационарных сигналов УВ.

Методы исследования сигналов УВ во временной и спектральной области. В настоящее время в процессе вибродиагностики роторных машин применяются следующие основные методы измерения и оценивания параметров сигналов вибраций:

- ударных импульсов;
- пик-фактора;
- интегрального уровня вибраций;
- прямого спектра;
- спектра огибающей;
- вейвлет – анализ;
- анализ кепстра.

Исходя из оценки количества методов, можно сделать вывод, что ни один из них не обеспечивает требуемой полноты и точности измерений сигнала УВ, т.к. все они чувствительны только к сильно развитым дефектам. Этот вывод подтверждается тем, что в научных и специальных источниках информации акцентируется внимание на недостаточной точности методов измерений амплитуд гармоник основных частот УВ, применяющихся в промышленности.

Перечисленные методы можно разделить на два класса по критерию пространства аргумента функции вибропараметра: методы анализа сигнала во временной и спектральной областях.

В результате экспериментальных исследований сделан вывод об адаптации спектральных методов ана-

лиза к процессам потерь энергии: метод прямого спектра – анализ параметров зубцовых сигналов; спектра огибающей – параметры небаланса роторов; вейвлет- и кепстральный анализ – сигналы потерь энергии в подшипниках.

Проведем анализ достоинств и недостатков перечисленных методов.

Методы анализа сигнала УВ во временной области. Обобщающим свойством перечисленных методов является обработка сигнала УВ во времени, что исключает переход в пространство частот. Данный подход позволяет избежать недостатков, присущих спектральному методу (рассмотрены ниже), однако он не позволяет идентифицировать источник сигнала УВ, который характеризуется частотным параметром. Дополнительно можно отметить, что методы пик-фактора и интегрального уровня вибраций требуют вычисления среднеквадратического значения сигнала УВ, что приводит к погрешностям осреднения и противоречит требованиям ГОСТ 52526-2006 [2].

Методы анализа сигнала УВ в спектральной области. Обобщающим свойством перечисленных методов является обработка сигнала УВ в спектральной и псевдоспектральной (вейвлет – и кепстральный анализ) областях. Корректное применение спектральных методов требует определённых свойств сигнала УВ.

Известно [4], что информацию о параметре потерь энергии в редукторе отображает функция вариации частот ω энергетического спектра $S(\omega, t)$ виброакустического информационного сигнала $s(t)$, который излучается при кинематическом взаимодействии деталей (валов, шестерён, подшипников). Традиционный метод анализа функции вариации $S(\omega, t)$ основан на непрерывном исследовании спектральных характеристик реализаций информационного сигнала $s(t)$ в соответствии с классическим выражением

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt,$$

которое для применяемого метода преобразуется к математической модели статистической оценки спектральных характеристик.

$$\langle S(\omega, t) \rangle = \int_0^{T_p} \langle s(t) \rangle e^{-j\omega t} dt; \quad t \in T_p, i \in n,$$

где $\langle \dots \rangle$ – операция статистического усреднения по ансамблю реализации;

T_p – время усреднения, равное постоянной времени фильтра;

i – количество анализируемых частотных составляющих.

Строгая адекватность спектральной модели обеспечивается при наличии свойства стационарности реализации информационного сигнала $s(t)$ на интервале времени T_p . Метод анализа спектральных характеристик $\langle S(\omega, t) \rangle$ предполагает подтверждение гипотезы о стационарности, однако результатов исследования и анализа этой гипотезы для виброакустического информационного сигнала, излучаемого при технологическом воздействии деталей редуктора, нами не обнаружено и является предметом исследований в рамках поставленной задачи.

Проведенний нами попередній аналіз функцій характеристических параметрів свойства стаціонарності сигналу УВ показує:

– його не можна вважати строго стаціонарним навіть в широкому сенсі;

– параметр частоти дискретизації нестационарних сигналів не визначається за критерієм Котельникова і вимагає проведення додаткових досліджень;

– адекватність застосування математическої моделі спектральних перетворень може визначатися виходячи з конкретної технологіческої необхідності і інформаційною відстанню між ідентифікуючими ознаками інформаційного сигналу.

Стан деталей машин. В нинішній час, застосовувані виробничі методи вимірювання вібрацій не можуть дати повного уявлення про слабозрозумілі дефекти, подальше розвиток яких може призвести до втрати матеріальної частини машини. В частині, для зубчатих колес основною причиною виникнення дефектів є втоми контактні напруження. За виду руйнування контактні руйнування можна розділити на поверхнісні і глибокі.

Основними причинами поверхнісного контактного руйнування є прогресуючі вищавлення зубів. Такий вид контактних руйнувань веде до збільшенню питомої навантаження, зменшенню довжини контактної лінії.

Глибокі контактні руйнування представляють найбільшу небезпеку через відокремлення ділянок зубів достаточних розмірів, щоб вивести зубчасту передачу із строю. Акустическі засоби діагностики часто не можуть своєчасно виявити подібні поломки, внаслідок чого розвиток методів діагностики дозволить зекономити час і засоби на виявлення і усунення дефектів.

Висновки. Проведенний аналіз адекватності традиційних методів діагностики ресурсу деталей ГТД дозволяє зробити наступні висновки.

1. Традиційні методи аналізу не забезпечують необхідної повноти і точності вимірювань сигналу УВ, всі вони чутливі тільки до сильно розвинутих дефектів. Розв'язання даного питання необхідно шукати з допомогою методологіческого компромісу в часовій і спектральній області з урахуванням параметрическої адаптації під конкретні вузли і деталі ГТД.

2. Сигнал датчиків вібрацій не можна вважати стаціонарним навіть в широкому сенсі, в зв'язі з цим, параметр частоти дискретизації нестационарних сигналів не визначається за критерієм Котельникова і вимагає проведення додаткових досліджень в рамках поставленої задачі.

Список літератури

1. Акимов В. М. Основы надежности газотурбинных двигателей. [Текст] / В. М. Акимов. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
2. ГОСТ 52526-2006 Установки газотурбинные с конвертируемыми авиационными двигателями. Контроль состояния по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 18 с.
3. ГОСТ 27310-95. Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 10 с.
4. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справочник / Под ред. Э. Б. Вулгакова. [Текст]. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.
5. Аш Дж. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн. 2; пер с франц. [Текст]. – М.: Мир, 1992. – 424 с.
6. ГОСТ 10816-4-2002 [ГОСТ Р ИСО 10816-4-99]. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях. Часть 4. Газотурбинные установки. [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 22 с.
7. ГОСТ ИСО 7919-1-2002 [ГОСТ Р ИСО 7919-1-99]. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования. [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 22 с.
8. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 22 с.

References (transliterated)

1. Akimov V. M. *Osnovy nadezhnosti gazoturbinyh dvigatelej* [Basics of reliability of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 207 p.
2. *GOST 52526-2006. Ustanovki gazoturbinye s konvertiruemyimi aviacionnymi dvigateljami. Kontrol' sostojanija po rezul'tatam izmerenij vibracii na nevrashhajushhijhsja chastjah* [Gas turbine installations with convertible aircraft engines. Monitoring of the state from the results of vibration measurements on non-rotating parts]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1988. 18 p.
3. *GOST 27310-95 Nadjozhnost' v tehnikе. Analiz vidov, posledstvij i kritichnosti otkazov. Osnovnyje polozenija* [Reliability in technology. Analysis of species, consequences and criticality of failures. Basic Provisions]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1995. 10 p.
4. Vulgakova Je. B. *Aviacionnye zubchatye peredachi i reduktory*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 374 p.
5. Ash Dzh. *Sensors for measuring systems. V 2-h knigah. kn. 2; per s franc.* (Russ. ed.: ed. Ash Dzh *Datchiki izmeritel'nyh sistem*. Moscow, Mir Publ., 1992. 424 p.
6. *GOST 10816-4-2002 [GOST R ISO 10816-4-99] Vibracija. Kontrol' sostojanija mashin po rezul'tatam izmerenij vibracii na ne vrashhajushhijhsja chastjah. Chast' 4. Gazoturbinye ustanovki* [Vibration. Monitoring the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts. Part 4. Gas turbine plants]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2002. 22 p.
7. *GOST ISO 7919-1-2002 [GOST R ISO 7919-1-99] Vibracija. Kontrol' sostojanija mashin po rezul'tatam izmerenij vibracii na vrashhajushhijhsja valah. Obshhie trebovanija* [Vibration. Monitoring the condition of machines based on the results of vibration measurements on rotating shafts. General requirements.]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2002. 22 p.
8. *GOST 27655-88 Akusticheskaja jemissija. Terminy, opredelenija i oboznachenija* [Acoustic emission. Terms, definitions and notation.]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1988. 22 p.

Поступила (received) 18.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз методів діагностики ресурсів деталей редукторів газотурбінних двигунів / А. Б. Єдинович, О. В. Папченков, А. В. Колоколов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 53–56. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0791.

Анализ методов диагностирования ресурса деталей редукторов газотурбинных двигателей / А. Б. Єдинович, А. В. Папченков, А. В. Колоколов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 53–56. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0791.

Analysis diagnostics method resources reducer parts of Gas turbine engines / А. В. Edinovich, А. В. Papchenkov, А. V. Kolokolov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 53–56. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0791.

Єдинович Андрій Борисович – ДП "Івченко-Прогрес", ведучий інженер; тел.: (066) 238-70-62.

Єдинович Андрій Борисович – ГП "Івченко-Прогрес", ведучий інженер; тел.: (066) 238-70-62.

Edinovich Andrey Borisovich – SE "Ivchenko-Progress", lead engineer; tel.: (066) 238-70-62.

Папчонков Олександр Вікторович – АТ "Мотор Січ", заст. технічного директора з нових виробів; e-mail: papchonkov@gmail.com.

Папчонков Александр Викторович – АО "Мотор Сич", заместитель технического директора по новым изделиям; e-mail: papchonkov@gmail.com.

Papchonkov Aleksander Viktorovich – Motor Sich JSC, deputy technical director of new product; e-mail: papchonkov@gmail.com.

Колоколов Александр Володимирович – ДП "Івченко-Прогрес", інженер; e-mail: aleksanderkolokolov@gmail.com.

Колоколов Александр Владимирович – ГП "Івченко-Прогрес", інженер; e-mail: aleksanderkolokolov@gmail.com.

Kolokolov Aleksander Volobymyrovich – SE "Ivchenko-Progress", engineer; e-mail: aleksanderkolokolov@gmail.com.

УДК 620.178.16 : 621.892

А. В. ЗАХАРЧЕНКО

ИЗНАШИВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ОБРАЗУЕМЫХ ПРИСАДКАМИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ

На підставі сучасних трибологічних джерел пропонується аналітичний огляд шляхів вирішення проблеми вибору за будовою, властивостями і складом вторинних структур тонких поверхневих шарів трибоспряжень визначеного мастильного матеріалу, який відповідає конкретним умовам експлуатації. Систематизовано вимоги для знаходження порогових значень результату сумісної дії теплових і механічних навантажень, коли поверхневі шари тіл, які труться, становляться хімічно і каталітично активними, що є необхідним для інтенсифікації процесів утворення ефективного хімічно модифікованого шару.

Ключові слова: вторинна структура, поверхня тертя, поверхневий шар, пакет присадок, хімічно активні речовини, хемосорбція, хімічно модифікований шар.

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по строению, свойствам и составу вторичных структур тонких поверхностных слоёв трибосопряжений определённого смазочного материала, который соответствует конкретным условиям эксплуатации. Систематизированы требования для нахождения пороговых значений результата совместного действия тепловых и механических нагрузок, когда поверхностные слои трущихся тел становятся химически и каталитически активными, что есть необходимым для интенсификации процессов образования эффективного химически модифицированного слоя.

Ключевые слова: вторичная структура, поверхность трения, поверхностный слой, пакет присадок, химически активные вещества, хемосорбция, химически модифицированный слой.

On the basis of up-to-date tribology sources the analytical review of the ways to resolve the problem of choice accounting for the structure, property and composition secondary structures of superficial layers in the tribounits of an oil material appropriate for the specific conditions of maintenance is presented. The requirements are systematised for determining the threshold values for the outcome of joint action of thermal and mechanical load when the friction surfaces become chemically and catalytically active that is needed for the intensification of an effective chemically modified layer formation processes. Because of cooperating of the superficial layers activated by a friction with (lubricating) an environment on the surfaces of friction secondary structures which on a structure appear spontaneously, it is radically differed properties and composition from pre-product and are a new phase, possessing extreme antifricition and antiwear properties. In secondary structures accumulated 90-98 % energies of friction. In the certain range of speeds, loading and temperatures ("range of structural adaptability") coefficients of friction and wear in oftentimes below, than outside this range (a "normal" wear is carried out), and after his limits, passing is carried out to the mode of "pathological wear". It is explained by that in the range of structural adaptability processes of education and destruction of secondary structures on the surfaces of friction are in a dynamic equilibrium, and out of this range there is violation of this equilibrium, that conduces to passing either to the intensive adhesion wear or to the intensive corrosive-mechanical wear.

Keywords: secondary structure, friction surface, surface layer, additive package, chemically active substances, chemisorption, chemically modified layer.

Актуальность задачи. Одной из важнейших задач для обеспечения антифрикционных и противозносных свойств трибосопряжений является оптимизация концентрации пакетов присадок в базовых маслах [1]. Пути оптимизации концентрации химически активных веществ в маслах в настоящее время не являются до конца объективными благодаря их ориентированности только на физико-химические свойства самих масел в условиях поставки. Абсолютно не учитывается при определении эффективности и срока службы смазочных материалов (СМ) такой важный фактор, как влияние химического состава и эксплуатационных свойств масел на структурную однородность и микро-механические характеристики поверхностных слоёв трибосопряжений [2]. Определение оптимальной кон-

центрации пакетов присадок в маслах приведёт к их рациональному использованию, что даст существенную экономию горюче-смазочных ресурсов и конструктивных материалов в Украине [3].

Необходимость предлагаемой работы определяется значительной проблемой рационального использования новых высокоэффективных комплексных фосфор- и серосодержащих товарных пакетов присадок, используемых заводами-производителями нашей страны в качестве легирующих элементов при изготовлении товарных трансмиссионных масел (ТМ), имеющих значительную стоимость и не всегда соответствующих эксплуатационным требованиям и потребностью предприятий-эксплуатантов техники в современных ТМ отечественного производства для конкретных