

УДК 629.735.45:621.833(031)

А. В. ПАПЧЁНКОВ¹, С. А. БОРЗОВ²¹ ПАО "Мотор Сич», Запорожье, Украина² ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ ГТД

В статье обсуждаются основные проблемные вопросы современной теории и практики технической диагностики деталей редукторов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), от решения которых, в конечном счете, зависит значимое повышение их эксплуатационного ресурса. 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 сигналов.

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 ПСИ ГТД.

1. Основная часть

Объектно-ориентированная стендовая система диагностики вибраций редуктора в процессе ПСИ ГТД предназначена для решения следующих задач:

- измерения уровня вибрации (УВ) на корпусах редукторов в реальном масштабе времени;
- оценку максимальных значений УВ в части соответствия нормам и требованиям ГОСТ 52526-2006 [2];
- оценку текущих значений УВ, сортировку их по принадлежности к деталям редуктора, запись в рабочую базу данных;
- оценку скорости и ускорения изменений УВ деталей редуктора;
- расчёта параметров постепенного отказа деталей редуктора в соответствии с ГОСТ 27310-95 [3];
- вероятностного расчета ресурса редуктора.

1.1. 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].

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).

1.2. Устройства и методы обработки параметров энергии сигналов УВ по ГОСТ 10816-4-2002 [6] и ГОСТ ИСО 7919-1-2002 [7]

Датчики

Из всей существующей номенклатуры датчиков вибраций [5] наиболее эффективны в эксплуатационном режиме приборы, работающие на основе пьезоэлектрического эффекта. Однако они имеют следующие 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.

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 анализа 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 (рассмотрен 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

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

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.

Проведённый предварительный анализ функций характеристических параметров свойства стационарности сигнала УВ показывает:

– его нельзя считать строго стационарным даже в широком смысле;

– параметр частоты дискретизации нестационарных сигналов не определяется по критерию Ко-

тельникова и требует проведения дополнительных исследований;

– адекватность применения математической модели спектральных преобразований может определяться исходя из конкретной технологической необходимости и информационным расстоянием между идентифицируемыми признаками информационного сигнала.

Выводы

Проведённый анализ адекватности традиционных методов диагностирования ресурса деталей авиационных редукторов ГТД позволяет сделать следующие выводы.

1. Традиционные методы анализа не обеспечивают требуемой полноты и точности измерений сигнала УВ, все они чувствительны только к сильно развитым дефектам. Решение необходимо искать при решении задачи методологического компромисса во временной и спектральной области с учётом параметрической адаптации под конкретные узлы и детали ГТД.

2. 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.

Литература

1. Акимов, В. М. Основы надёжности 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 [Текст] : справ. / под ред. Э. Б. Вулгакова. – М. : Машиностроение, 1981. – 374 с.
5. Аш, Дж. Датчики измерительных систем [Текст] : В 2-х книгах. Кн. 2 : пер с франц. / Дж. Аш. – 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 невращающихся частях. Ч. 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.

Поступила в редакцию 25.05.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зам. нач. В. Н. Журавлев, Управление информационных технологий ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье.

АНАЛІЗ АДЕКВАТНОСТІ ТРАДИЦІЙНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ ГТД

О. В. Папченко, С. А. Борзов

У статті обговорюються основні проблемні питання сучасної теорії й практики технічної діагностики деталей редукторів авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), від рішення яких, в остаточному підсумку, залежить значиме підвищення їх експлуатаційного ресурсу. Аналіз результатів теоретичних досліджень, дозволяє зробити висновок, що, зокрема, сигнал датчиків вібрацій не можна вважати стаціонарним навіть у широкому змісті, у зв'язку із цим, параметр частоти дискретизації нестационарних сигналів не визначається за критерієм Котельникова й вимагає проведення додаткових досліджень у рамках поставленого завдання.

Ключові слова: діагностування ресурсу деталей, сигнали вібрацій, методи обробки сигналів.

ADEQUACY ANALYSIS OF TRADITIONAL METHODS LIFETIME DIAGNOSTIC OF GAS TURBINE ENGINE PARTS

A. V. Papchonkov, S. A. Borzov

The paper discusses 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.

Key words: lifetime part diagnostic, vibration signal, signal processing methods.

Папчєнков Александр Викторович – зам. технического директора по новым изделиям, ПАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: papchonkov@gmail.com.

Борзов Сергей Анатольевич – ведущий конструктор отдела камер сгорания, руководитель группы жаровых труб, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: kpr345@i.ua.