

УДК 621.833:519.004

Н.И. БУРАУ, Ю.В. СОПИЛКА

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Украина

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ГТД

Рассматриваются особенности синтеза системы виброакустической диагностики трещиноподобных повреждений лопаток как составной части интегрированной автоматической системы мониторинга ГТД, вопросы методики проведения измерений и обработки диагностической информации.

мониторинг, виброакустическая диагностика, трещиноподобные повреждения, структурный синтез, методика измерений, обработка информации

Введение

Одним из направлений обеспечения надежности ГТД на всем протяжении его жизненного цикла, в том числе и непосредственно в полете, является развитие автоматизированных систем диагностики (АСД), которые представляют собой интегрированные информационно-диагностические комплексы (ИДК) для мониторинга технического состояния (ТС) систем узлов и элементов ГТД на основе использования параметрических, вибрационных, виброакустических и других методов диагностики [1]. Концепция структурно-параметрического синтеза АСД [2] определяет основные три уровня задач синтеза: разработка измерительных систем (ИС), синтез алгоритмического и программного обеспечения (АПО), разделение алгоритмов диагностирования между бортовыми и наземными составляющими АСД. Это соответствует определению диагностирования, как единого информационного процесса получения, преобразования и анализа диагностической информации для принятия решения о ТС ГТД, и обеспечивает методическую связь между прикладными задачами проектирования АСД и современными достижениями в областях обработки информации и информационных технологий.

В общем случае АСД – это многоканальная система, которая для каждого из режимов испытаний

или эксплуатации двигателя обеспечивает решение множества информационных задач [3]. При этом ИДК обеспечивают оптимальное разделение процессов решения задач мониторинга и диагностики между бортовыми и наземными системами, а также передачу в режиме реального времени полной информации о состоянии двигателя на наземные системы анализа информации и принятия решений. Все это позволяет качественно повысить достоверность ранней диагностики и прогнозирования ТС ГТД за счет использования мощных нейросетевых алгоритмов и интегрированных баз данных.

Формулирование проблемы. Разработка системы виброакустической диагностики трещиноподобных повреждений (ТП) лопаток ГТД, как составной части единого ИДК, базируется на результатах решения комплекса связанных между собой теоретических и практических задач, главными из которых являются следующие:

- исследование вибрационных и виброакустических процессов на стационарных и нестационарных режимах эксплуатации ГТД, определение влияния ТП на характеристики измеренных вибрационных и виброакустических сигналов;
- выбор системы необходимых средств измерений вибрационных и виброакустических сигналов, а также мест их размещения на объекте;

- разработка, усовершенствование и оптимизация методов обработки диагностической информации;
- определение системы диагностических признаков и установление их пороговых значений;
- построение системы распознавания текущего ТС;
- разработка системного АПО всего информационного диагностического процесса.

В данной статье рассматриваются особенности структурного синтеза системы виброакустической диагностики и основные вопросы методики проведения измерений и обработки диагностической информации.

1. Решение проблемы

1.1. Структурный синтез системы. В общем случае система виброакустической диагностики должна обеспечивать решение следующих характерных задач, которые возникают в условиях доводки, испытаний и эксплуатации двигателя:

- общие исследования вибрационного и виброакустического состояния ГТД для изучения причин и особенностей вибрационного возбуждения ГТД;
- исследования по выявлению отдельных типов повреждений в системах, узлах и элементах двигателя, возможности мониторинга их развития путем решения специфических задач измерения, анализа и распознавания;
- непосредственный мониторинг вибрационного и виброакустического состояния ГТД, диагностика и оценивание параметров повреждения, распознавание ТС систем, узлов и элементов двигателя по отработанным на предыдущих этапах методикам и в условиях значительного сжатия информации.

Функционально система диагностики ТП лопаток ГТД включает в себя ИС, систему обработки информации и систему распознавания ТС лопаток. ИС содержит вибрационные преобразователи, измерители акустического шума и датчик частоты вра-

щения с соответствующими устройствами усиления, нормирования и преобразования измеренных сигналов. Сигнал частоты вращения ротора используется для временной селекции выборок вибрационных и акустических сигналов.

Для обработки диагностической информации на стационарных и нестационарных режимах функционирования ГТД предлагается использовать многомерный спектральный анализ (биспектральный), частотно-временной анализ, вейвлет - фильтрацию и анализ безразмерных амплитудных дискриминант – коэффициентов импульсности и фона [4, 5].

Система распознавания строится на основе нейросетевых алгоритмов, например, с использованием вероятностных нейронных сетей [6, 7].

Важным аспектом в процессе диагностирования является сжатие информации на всех его этапах, начиная с выбора количества, типов и мест установки измерителей, и заканчивая этапом принятия решения на имеющемся множестве признаков. Оптимальная степень сжатия информации определяется в процессе экспериментальных исследований системы при решении упомянутых выше первых двух задач.

С учетом изложенного выше, сформированы отдельные измерительные каналы системы (рис. 1), которые отличаются только датчиком первичной информации (типом и местом установки). Использование частотно-временного анализа (блоки 9 и 11) кроме диагностики ТП лопаток позволяет реализовать в системе синхронный следящий анализ.

Обработка диагностической информации принятие решения о ТС лопаток реализуются на базе микропроцессорной техники (как, например, FADEC) или ПЭВМ (для мобильных ИДК). Использование современных информационных технологий при мониторинге ТС ГТД обеспечит расширение возможностей и повышение эффективности вибрационной и виброакустической диагностики за счет:

- параллельной обработки информации;
- адаптации методов и алгоритмов диагностирования к конкретному типу двигателя, режимов,

эксплуатации и условий проведения измерений;

- использования современных эффективных методов цифровой обработки сигналов и распознавания ТС;
- алгоритмического повышения точности определения диагностических признаков;
- расширения возможностей решения дополнительных диагностических задач для конкретного ГТД путем привлечения дополнительного АПО для базовых аппаратурных средств.

Структура АПО для системы параллельной обработки диагностической информации на основе описанных выше методов приведена на рис. 2. Кроме проиллюстрированных задач по непосредственной обработке информации, в общую структуру АПО системы диагностики входят сервисные программы, драйверы связи, программы организации регистрации и считывания данных, программы оценивания параметра повреждения, программы для формирования объектов обучаемых множеств образов, программы реализации и обучения нейронных сетей, программы организации классификации. А также программы для организации накопления данных, формирования документации, для текущей и итоговой визуализации и хранения результатов.

1.2. Некоторые вопросы методики виброакустического диагностирования. Методика диагностирования ТП лопаток ГТД состоит из подготовительного этапа, на котором разрабатывается общий план подготовки и проведения испытаний, и этапов, связанных с разработкой программ, оптимизацией ИС и непосредственным проведением вибрационных и виброакустических измерений в процессе доводки и восстановления ГТД, наземного обслуживания перед эксплуатацией, или в процессе эксплуатации. При этом каждая программа характеризуется определением количества и мест установки вибрационных и акустических преобразователей, режимов ГТД, частотного диапазона измерений, перечня необходимых для данных исследований

аппаратурных средств и АПО, методик настройки и тестирования ИС, порядка проведения испытаний. На каждом из перечисленных этапов диагностирования решаются характерные задачи для обеспечения проведения исследований, а также непосредственно во время их проведения. Однако, все этапы содержат и общие наборы задач, которые в основном связаны с вопросами методики проведения измерений и обработки диагностической информации. Рассмотрим наиболее важные из них.

Определение частотных диапазонов измеренных сигналов. Контроль роторной вибрации проводится в низкочастотной области (до 200-700 Гц), для диагностики ТП в лопатках необходимо анализировать частотные диапазоны в средних (1,2-2 кГц для компрессора) и высших (3,5-10 кГц для турбины) интервалах общего частотного диапазона вибрации и шума ГТД (до 10 кГц). Выделение требуемых частотных полос производится при разделении измерительных каналов в блоке 3 (рис. 1) и формировании параллельных каналов, количество которых определяется при предварительных испытаниях для каждого измерительного канала.

Аналого-цифровое преобразование. Частота дискретизации f_d не менее 20 кГц, для мобильных систем при использовании звуковой карты обеспечивается частота дискретизации не менее 10 кГц, разрядность – не менее 12.

Формирование выборок. Необходимая длина выборки зависит от режима работы ГТД, характера измеренных сигналов, точности измерений, принципа организации анализа информации (в реальном времени, после накопления информации), метода обработки информации (разрешающая способность, вычислительная мощность средств обработки). Для получения устойчивых характеристик в реальных условиях измерений на стационарных и нестационарных (запуск, приемистость, дросселирование) режимах ГТД длительность выборок (количество точек) определяются в интервалах $N_{\min} = 10 f_d f_n^{-1}$ и

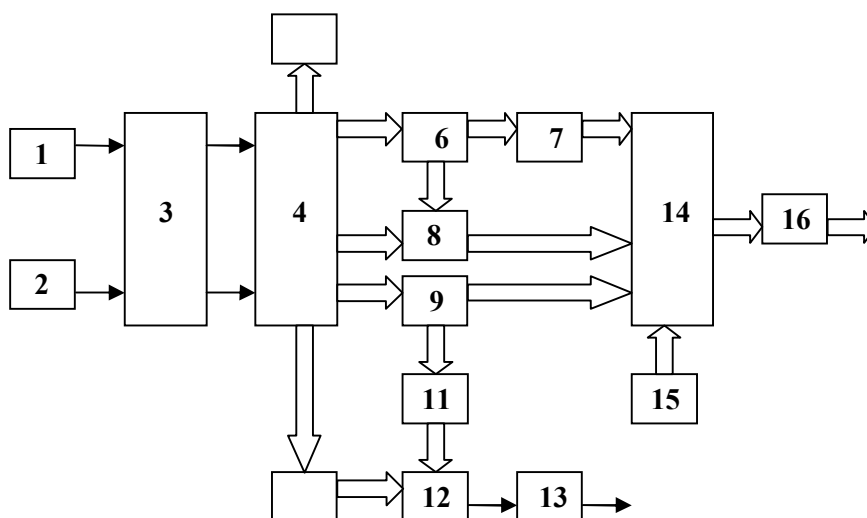


Рис. 1. Функциональная блок-схема измерительного канала системы

1 – датчик вибрации (шума); 2 – блок измерения частоты вращения; 3 – блок усиления и преобразования сигнала; 4 – блок формирования выборок; 5 – блок накопления и хранения данных; 6 – блок вейвлет – фильтрации; 7 – блок определения амплитудных дискриминант; 8 – блок оценивания модуля биспектра; 9 – блок частотно – временного анализа; 10 – блок оценивания частоты вращения на выделенных временных интервалах; 11 – блок оценивания временного расположения экстремумов частотно–временных спектров; 12 – блок оценивания кратности экстремумов частотно–временных спектров; 13 – блок для реализации следающего анализа; 14 – блок оценивания параметра ТП и классификации; 15 – блок хранения объектов обучающих множеств признаков; 16 – блок установления диагноза

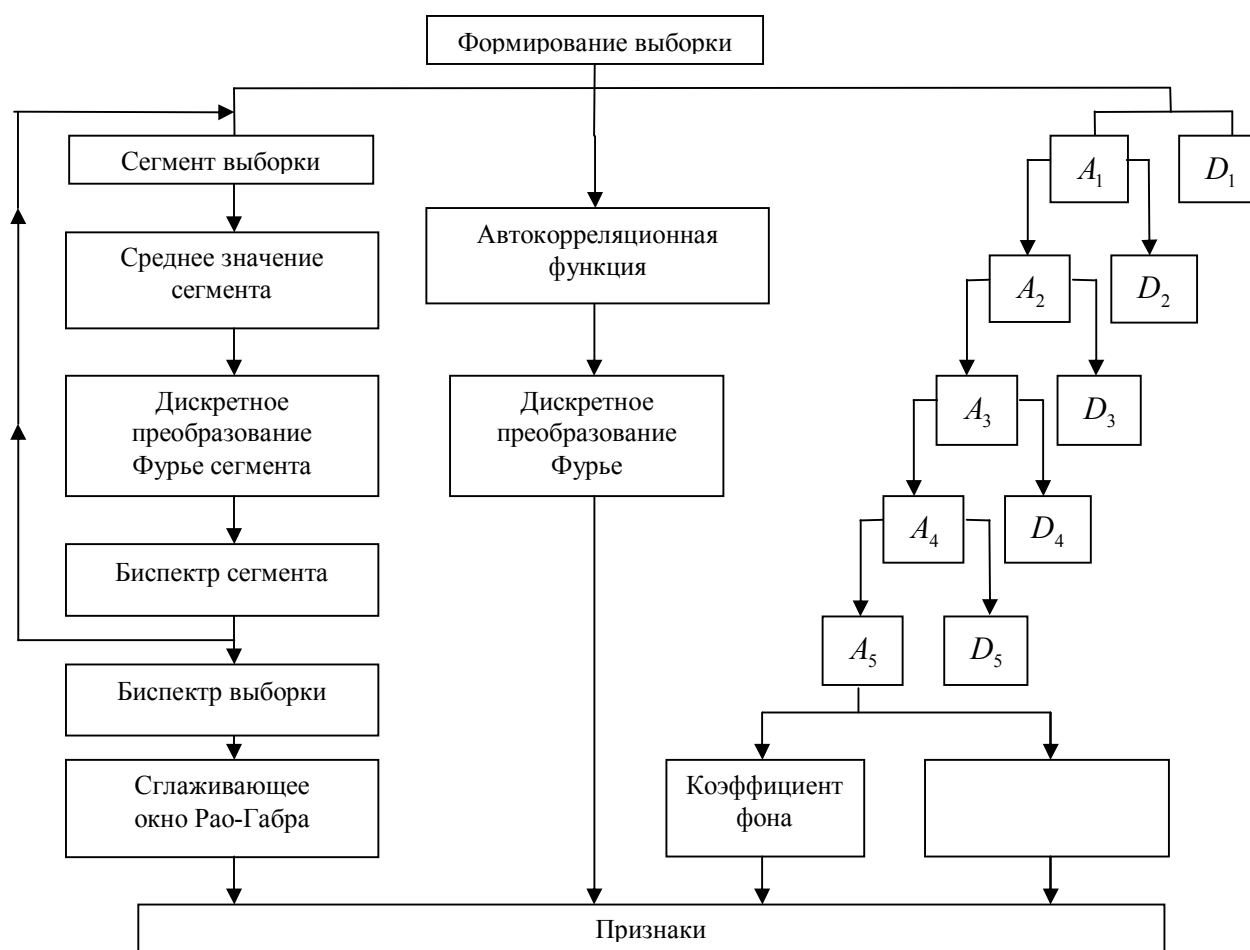


Рис. 2. Структура АПО для системы параллельной обработки информации

$N_{\max} = 100 f_{\Delta} f_n^{-1}$, где f_n – частота самой низкочастотной составляющей в анализируемой полосе частот.

Организация параллельной обработки информации. Параллельная обработка может быть организована аппаратными или программными средствами (рис. 2), она способствует повышению производительности и надежности АПО, при необходимости обеспечивает возможность модульного расширения системы. После сжатия информации на этапах измерения и преобразования, при использовании указанных ранее методов обработки формируется избыточная информация о текущем ТС лопаток. Но так как используемые методы обеспечивают анализ сигналов во временной, частотной, частотно-временной областях, то полученные параллельно результаты будут дополнять друг друга и сужать область неопределенности.

Заключение

Разработка ИДК в целом и системы виброакустического мониторинга состояния лопаток ГТД, как составной части ИДК, остается актуальной задачей не только в эксплуатации, но и для испытаний ГТД в процессе их доводки и восстановления, при создании вибрационных и акустических паспортов отдельных систем двигателя. Использование таких систем позволит не только повысить достоверность контроля и обеспечить более раннее обнаружение дефекта, но и уменьшить число испытаний двигателя, сократить расходы, ускорить доводку и повысить надежность ГТД в эксплуатации.

Литература

1. Егоров И.В. Комплексная сетевая система диагностирования газотурбинных двигателей // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – №8 (24). – С. 181-185.

2. Епифанов С.В. Комплекс методических и программных средств для синтеза автоматизированных систем параметрической диагностики ГТД // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – 2000. – Вып. 21. – С. 67-75.

3. Опыт эксплуатации автоматизированных систем диагностирования газотурбинных приводов семейства НК на газоперекачивающих станциях / В.Б. Коротков, В.Н. Михнович, А.В. Оболенский, Ю.Н. Тарасенко // *Вестник двигателестроения*. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2004. – № 2. – С. 165-167.

4. Бурау Н.И. Оценка информативности диагностических признаков трещинно-подобных повреждений в лопатках ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – Вып. 7 (15). – С. 179-183.

5. Бурау Н.И., Сопилка Ю.В. Повышение чувствительности дискриминантных признаков трещины в задачах виброакустической диагностики элементов роторных систем // *Акустичний вісник*. – 2003. – Т.6, №. 3. – С.10-17.

6. Бурау Н.И., Зажицкий А.В., Сопилка Ю.В. Распознавание состояния объекта виброакустической диагностики по результатам многомерного спектрального анализа // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2004. – №2. – С. 3-8.

7. Бурау Н.И., Зажицкий О.В. Розпізнавання нейронною мережею стану лопаток ГТД на стаціонарних та нестаціонарних режимах експлуатації // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 4 (20). – С. 71-76.

Поступила в редакцию 29.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Д. Гераимчук, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.

