

УДК 629.7.018

А.Н. ПОНОМАРЕВ, А.В. СИЧЕВОЙ

Днепропетровский национальный университет, Украина

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИМПУЛЬСНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Исследования направлены на повышение уровня надежности изделий авиационно-космической отрасли. Описано применение систем функциональной диагностики при стендовых испытаниях. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований элементов автоматики пневмогидравлических систем питания жидкостных ракетных двигателей. Представлена методика обработки экспериментальных данных импульсно-акустического метода диагностики с использованием математического аппарата распознавания образов. Приведены решающие правила распознавания технического состояния объекта диагностирования по результатам испытаний.

Ключевые слова: техническая диагностика, контроль, испытания, надежность, вибродиагностика.

Введение

Проектирование и производство сложных технических систем, к которым относится современная ракета-носитель и другие летательные аппараты, требует обеспечения их надежности и безаварийной эксплуатации.

Для достижения требуемого уровня надежности изделий авиационно-космической техники применяется широкий спектр методов испытаний на всех этапах жизненного цикла.

Одной из ответственных систем ракеты-носителя является пневмогидравлическая система питания жидкостной ракетной двигательной установки (ПГСЖ ЖРДУ) [1].

Разработка новых и совершенствование существующих методов контроля и диагностики является одним из способов повышения проектно-технологической надежности изделий авиационно-космической техники. Отдельное место занимает система функциональной диагностики (СФД), ее особенность заключается в том, что для ее работы на испытуемый объект не подаются никакие воздействия от средств диагноза [2].

Применение систем функциональной диагностики при стендовых и летных испытаниях существенно повышает надежность и работоспособность ракетно-космической техники. Разработка СФД включает в себя подбор метрологического оборудования, комплекс обеспечения сбора и регистрации экспериментальных данных, применение математических моделей испытуемых объектов, использование моделирования технических состояний объектов и возможных неисправностей, а также обработ-

ку полученных данных с последующим диагнозом или заключением о техническом состоянии.

1. Экспериментальная часть

На основании проведенного исследования конструкций элементов автоматики ПГСЖ ЖРДУ определены объекты диагностирования – электропневмоклапаны (ЭПК), электрогидроклапаны (ЭГК).

На основании статистических данных отработки и эксплуатации агрегатов автоматики, производства для указанных конструкций определены наиболее характерные неисправности: заедание, заклинивание, появление надиров, расклепывание или расстрескивание уплотнительных элементов, попадание инородных частиц, недооткрытие, недозакрытие, неточность срабатывания по времени.

Поставлена задача диагностирования состояния элементов автоматики ПГСЖ – клапанов, регуляторов, переключателей, детали которых при срабатывании совершают поступательное движение с остановкой.

Вследствие этого они издают кратковременный (импульсный) виброакустический сигнал, который является носителем информации о техническом состоянии объекта.

Измерения и последующая обработка с использованием методов анализа для ударной вибрации позволяет использовать данный сигнал в качестве контролируемого параметра функциональной диагностики [3 – 5].

Для предварительной экспериментальной отработки методики был выбран серийный нормально закрытый ЭПК прямого действия.

Для проведения исследований разработана и смонтирована экспериментальная установка, состоящая из платформы для закрепления исследуемого клапана и сопряженного трубопровода, измерительных датчиков акустики и вибрации, аналого-цифрового преобразователя и ЭВМ.

На этапе испытаний в качестве измеряемых контролируемых параметров регистрировались акустические сигналы и значения вибраций на клапане и сопряженном элементе трубопровода.

Для испытаний были отобраны пять исправных одинаковых клапанов из одной партии, прошедших заводской контроль.

На первом этапе производились многократные испытания работоспособных клапанов. При испытаниях регистрировался временной процесс длительностью 6 мс (300 точек отсчета). На основании этих испытаний были получены усредненные эталонные значения контролируемых параметров для исправных клапанов (виброакустические портреты исправных объектов).

На втором этапе моделировались неисправные состояния клапанов. Поочередно искусственно вносились конкретные характерные неисправности. Для каждой неисправности повторялась процедура измерений. В результате получены усредненные «портреты неисправных состояний клапанов».

2. Анализ полученных результатов

Анализ и обработка полученных данных проводились с применением статистических методов распознавания образов – оценивался разбег измеряемых значений контролируемого сигнала, проводились сравнения энергетических показателей [6].

Для обработки экспериментальных данных применялась следующая методика:

1. Исходные данные:

$X_{ij}(k)$ – функция исходного сигнала;

$i = 1, 2, \dots, m$, $m = 5$ – номер клапана;

$j = 1, 2, \dots, n$, $n = 20$ – номер реализации измерения;

где

$k = 1, 2, \dots, N$, $N = 100$ – дискретные отсчеты.

2. Загрузка исходных данных:

$$X_{1j}(k), X_{2j}(k), X_{3j}(k), X_{4j}(k), X_{5j}(k).$$

3. Последовательность обработки сигнала:

3.1. Нормирование сигнала

$$S_{ij}(k) = \frac{X_{ij}(k)}{\sqrt{\mathcal{E}_{ij}}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{ij}^2(k)$ – энергия сигнала.

Нормирование обеспечивает приведение амплитуды сигналов к единому безразмерному масштабу, удобному для дальнейших операций.

3.2. Усреднение выборки для $n = 20$ измерений каждого клапана

$$\bar{S}_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_{ij}(k). \quad (2)$$

3.3. Расчет дисперсии

$$\bar{D}_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\bar{S}_i(k) - S_{ij}(k))^2.$$

3.4. Формирование статистического портрета нормы

$$\bar{S}_H(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{S}_i(k). \quad (3)$$

По результатам испытаний исправных клапанов получаем статистический портрет нормы исправного состояния.

3.5. Расчет дисперсии нормы:

$$\bar{D}_H(k) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\bar{S}_H(k) - S_{ij}(k))^2.$$

3.6. Вычисление пороговых значений нормы: верхний порог:

$$S_H P(k) = \bar{S}_H(k) + 2\sqrt{\bar{D}_H(k)};$$

нижний порог:

$$S_H O(k) = \bar{S}_H(k) - 2\sqrt{\bar{D}_H(k)}.$$

3.7. Расчет числовых показателей надежности (дополнение к портрету)

$$S_H = \frac{1}{mNn} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}(k). \quad (4)$$

3.8. Вычисление дисперсии:

$$D_H = \frac{1}{mNn} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S_H - S_{ij}(k))^2.$$

3.9. Нахождение числа выбросов в норме:

$$M_H = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m M_{ij}. \quad (5)$$

Для распознавания применены следующие решающие правила:

а) экспертная оценка отклонения поведения контролируемого сигнала от нормы – в том числе визуальное сравнение характера контролируемого сигнала;

б) предварительная оценка характера сигнала, включающая сравнение нормированного сигнала $S_j(k)$ исследуемого состояния со статистическим портретом нормы $\overline{S_n}(k)$ и пороговыми значениями нормы. Если функция контролируемого сигнала «входит» в область «нормы», то его можно считать соответствующим исправному состоянию агрегата;

в) сравнение числовых показателей – нормального отклонения и дисперсии (S_n, D_n) для заведомо исправного и исследуемого клапанов;

г) оценивание числа выбросов из «нормы» (M_n) для заведомо исправного и исследуемого клапанов;

д) сравнение энергетических характеристик контролируемого сигнала для исправного и исследуемого клапанов.

Поведение сигнала, регистрируемого во всех точках измерения при наличии неисправности, существенно отличается от сигналов, полученных на исправном клапане. Имеют место как аномальные выбросы по амплитуде сигналов, так и отклонения по времени появления максимумов амплитуд виброускорений и акустического сигнала. Это позволяет по первой оценке подтвердить наличие аномалий в работе клапана.

Предварительная оценка характера контролируемого сигнала дает следующие результаты – при деформации штока или разрушении уплотнительного элемента статистические портреты выходят за пороговые отклонения нормы. Аналогичная ситуация наблюдалась и при просадке уплотнительного элемента клапана.

Наличие неисправностей такого рода и степени диагностируется уверенно по статистическому портрету контролируемых сигналов. Засорение клапана посторонними частицами по статистическим характеристикам виброакустического сигнала практически находится в пределах нормы. Это же имело место и при незначительных перекосах уплотнительных элементов.

Информативность энергетической характеристики сигнала в отношении диагностирования неисправностей типа засорения клапана несколько выше, чем приведенных статистических характеристик. Сравнение энергии как акустического сигнала, так и сигнала виброускорений позволяет идентифицировать неисправность, обусловленную попаданием посторонних частиц в зазор седло-тарель.

Однако, и в случае использования энергетических характеристик, однозначного распознавания характера неисправности, тем более, степени развития неисправности, получить не удастся. Констатируя, в общем случае, работоспособность и информа-

тивность способа импульсно-акустической диагностики элементов автоматики, приходится признать необходимость дальнейшей экспериментальной отработки метода.

При этом представляется целесообразным как проведение испытаний элементов автоматики различных типов с различными неисправностями, с целью набора статистической информации, так и расширение перечня решающих правил.

В частности, наиболее информативным может быть частотный анализ контролируемого сигнала.

Также для идентификации применялись методы спектрального анализа, которые дали более уверенные результаты, что позволило выделить информативные компоненты исследуемых сигналов.

Для утверждения результатов идентификации применялись методы математического моделирования, внедрение которых позволило подтвердить работоспособность, достоверность и информативность предлагаемой методики.

Заключение

Разработанная методика с высокой степенью достоверности позволяет определять техническое состояние объекта диагностирования как исправное или выявить наличие характерных дефектов.

Экспериментальная отработка и предложенная методика обработки результатов показала работоспособность метода. Разработанный и изготовленный экспериментальный стенд позволяет исследовать различные типы элементов автоматики ПГСРН.

Полученные результаты могут быть использованы в других научных исследованиях, а также в практических задачах испытаний различных элементов и узлов вновь создаваемых изделий авиационно-космической техники.

Разработанная методика может быть также использована в других отраслях народного хозяйства.

Литература

1. Беляев Н.М. *Пневмогидравлические системы. Расчет и проектирование: Учеб. пособие для техн. ВУЗов* / Н.М. Беляев, Е.И. Уваров, Ю.М. Степанчук. – М.: Высш. шк., 1988. – 271 с.
2. Лихачев В.Я. *Техническая диагностика ПГС ЖРД* / В.Я. Лихачев, А.С. Васин. – М.: Машиностроение, 1983. – 204 с.: ил.
3. Биргер И.А. *Техническая диагностика* / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 238 с.
4. Генкин М.Д. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов* / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

5. Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т. 5 – Измерения и испытания. – М.: Машиностроение, 1981. – 496 с.

6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – С.Пб.: Питер, 2002. – 608 с.

Поступила в редакцию 17.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Н. Петренко, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.

**ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ІМПУЛЬСНО-АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ
ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОМАТИКИ
АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ**

О.М. Пономарьов, О.В. Сичевий

Дослідження направлені на підвищення рівня надійності виробів авіаційно-космічної галузі. Описано застосування систем функціональної діагностики при стендових випробуваннях. Розглядаються результати експериментальних досліджень елементів автоматки пневмогідролічних систем живлення ракетних двигунів. Наведена методика обробки експериментальних даних імпульсно-акустичного методу діагностики із застосуванням математичного апарату розпізнання образів. Наведені вирішальні правила розпізнання технічного стану об'єкта діагностування по результатам випробувань.

Ключові слова: технічна діагностика, контроль, випробування, надійність, вібродіагностика.

**TEST RESULTS PROCESSING OF PULSING - ACOUSTIC METHODS
FOR DIAGNOSTIC OF ELEMENTS OF AN AUTOMATICS
OF AEROSPACE TECHNIQUES**

A.N. Ponomaryov, A.V. Sichevov

Researches are directed on increase of a level of reliability of products of aerospace branch. Application of systems of functional diagnostics is described at bench tests. Results of experimental researches of elements of automatics of pneumatichydraulic power supply systems of liquid rocket engines are considered. The technique of processing of experimental data of a pulsing-acoustic method of diagnostics with use of the mathematical technology of recognition of images is presented. Deciding rules of recognition of a technical condition of object of diagnosing by results of tests are resulted.

Key words: technical diagnostics, control, testing, reliability, vibration-based diagnostics.

Пономарев Александр Николаевич – старший преподаватель кафедры энергетики физико-технического факультета Днепропетровского национального университета им. О.Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: alen_x@mail.ru.

Сичевый Алексей Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедры энергетики физико-технического факультета Днепропетровского национального университета им. О.Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: asi@ua.fm.