

НАЗЕМНЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВІДПРАЦЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОМАТИКИ ПНЕВМОГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

О.М. Пономарьов

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна 72,
м. Дніпро, 49010, Україна, e-mail: alenx2@gmail.com*

Анотація. Дослідження направлені на підвищення рівня надійності виробів авіаційно-космічної галузі. Описано застосування систем функціональної діагностики при стендових випробуваннях. Розглядаються результати експериментальних досліджень елементів автоматики 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.

Abstract. The design and production of sophisticated technical systems, which include modern rockets and other aircraft, requires their reliability and trouble-free operation. To achieve the required level of reliability of aerospace products, a wide variety of test methods are applied at all stages of the life cycle. One of the most important systems of the launch vehicle is the pneumatic hydraulic power system of the liquid rocket propulsion system. Development of new and improvement of existing methods of control and diagnostics is one way of increasing the design and technological reliability of products of aviation and space technology. The use of functional diagnostics systems for bench and flight tests significantly increases the reliability and efficiency of space rocket technology. 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. The results of experimental researches of elements of automatics of pneumatic hydraulic 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. The developed method with a high degree of accuracy allows to determine the technical condition of the object of diagnosis as defective or to detect the presence of characteristic defects. Experimental testing and the proposed method of processing the results showed the efficiency of the method.

Key words: TECHNICAL DIAGNOSTICS, CONTROL, TESTING, RELIABILITY, VIBRATION-BASED DIAGNOSTICS.

Анотация. 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.

Вступ

Проектування і виробництво складних технічних систем, як сучасна ракета і інші літальні апарати, вимагає забезпечення їх надійності і безаварійної експлуатації. Для досягнення необхідного рівня надійності ракетно-космічної техніки застосовується широкий спектр методів випробувань на всіх етапах життєвого циклу. Однією з найважливіших систем ракети-носія є пневмогідролічна система

живлення рідинного ракетного двигуна.

Розробка нових методів контролю і діагностики є одним із способів підвищення проектно-технологічної надійності виробів ракетно-космічної техніки. Особливість системи функціональної діагностики полягає в тому, що для її роботи на випробовуваний об'єкт не подаються жодні дії від засобів діагнозу. Вживання систем функціональної діагностики при стендових і льотних випробуваннях істотно підвищує

надійність і працездатність ракетно-космічної техніки. [1].

Постановка задачі

На підставі проведеного дослідження конструкцій елементів автоматики пневмогідролічних систем живлення рідинних ракетних двигунних установок визначені об'єкти діагностування – електропневмоклапани (ЕПК), електрогідроклапани (ЕГК).

На підставі статистичних даних відробітку і експлуатації агрегатів автоматики, виробництва для вказаних конструкцій визначені найбільш характерні несправності: заїдання, заклинювання, поява надирів, розклепування або розтріскування елементів ущільнювачів, попадання чужорідних часток, неповне відкриття, неповне закриття, неточність спрацювання за часом.

Поставлено завдання діагностування стану елементів автоматики систем живлення – клапанів, регуляторів, перемикачів, деталі яких при спрацюванні здійснюють поступальну ходу із зупинкою. Внаслідок цього вони видають короткочасний (імпульсний) віброакустичний сигнал, який є носієм інформації про технічний стан об'єкту. Виміри і подальша обробка з використанням методів аналізу для ударної вібрації дозволяє використовувати даний сигнал як контрольований параметр функціональної діагностики [2, 3].

Рішення задачі

Для початкового експериментального відпрацювання методики був вибраний серійний нормально закритий ЕПК прямої дії. Для проведення досліджень розроблена і змонтована експериментальна установка (Рисунок 1), що складається з платформи для закріплення досліджуваного клапана і зв'язаного трубопроводу, вимірювальних датчиків акустики і вібрації, аналого-цифрового перетворювача і ЕОМ [4].

На етапі випробувань як вимірювані контрольовані параметри реєструвалися акустичні сигнали і значення вібрацій на клапані і зв'язаному елементі трубопроводу. Для випробувань було відібрано п'ять справних однакових

клапанів з однієї партії, які пройшли заводський контроль.

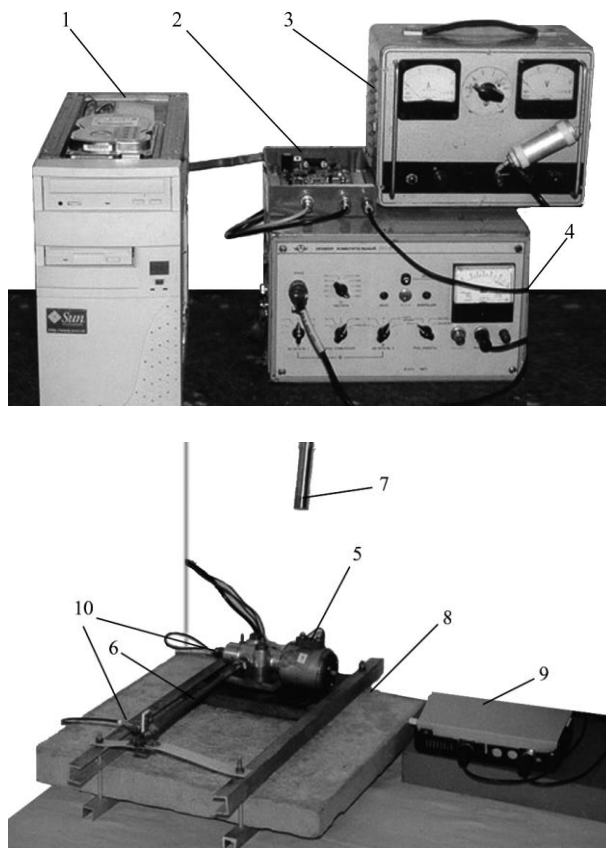


Рисунок 1 – Експериментальна установка:
1 – персональний комп'ютер; 2 – АЦП (на базі контролера ADUC-812 (Analog Device) (8 каналів АЦП, 1 канал ЦАП, 12 біт, частота дискретизації – 200000 вим/сек); 3 – блок живлення (24 В); 4 – вимірювальний прилад шуму та вібрації (ИШВ-1); 5 – випробуваний клапан; 6 – елемент трубопроводу; 7 – мікрофонний капсуль конденсаторний М 101 з попереднім підсилювачем; 8 – стендова плита; 9 – попередній підсилювач віброперетворювачів; 10 – п'єзо-електричні віброперетворювачі Д 14.

На першому етапі проводилися багатократні випробування працездатних клапанів. При вимірах реєструвався процес тривалістю 6 мс (300 точок відліку). На підставі цих даних були отримані усереднені еталонні значення параметрів що контролюються для справних клапанів (акустичні портрети справних об'єктів).

На другому етапі моделювалися несправні стани клапанів. По черзі штучно вносилися характерні несправності, для цих несправностей повторювалася процедура вимірів. В результаті отримані усереднені «портрети несправних станів клапанів».

Аналіз і обробка отриманих даних проводилися із застосуванням статистичних методів розпізнавання образів – оцінювався розбіг вимірюваних значень контрольованого сигналу, проводилися порівняння енергетичних показників сигналу.

Для обробки експериментальних даних застосовувалася наступна методика:

1. Вихідні дані:

$X_{ij}(k)$ – функція вихідного сигналу;

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

$j = 1, 2, \dots, n, n = 20$ – номер реалізації виміру;

$k = 1, 2, \dots, N, N = 100$ – дискретні відліки.

2. Загрузка вихідних даних:

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

3. Послідовність обробки сигналу

3.1. Нормування сигналу

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

де $\mathcal{E}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{ij}^2(k)$ – енергія сигналу.

Нормування забезпечує приведення амплітуди сигналів до єдиного безрозмірного масштабу, зручного для подальших операцій.

3.2. Усереднювання вибірки для $n = 20$ вимірів кожного клапана

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

3.3. Розрахунок дисперсії

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

3.4. Статистичний портрет норми

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

За результатами випробувань справних клапанів отримуємо статистичний портрет норми справного стану.

3.5. Розрахунок дисперсії норми

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

3.6. Обчислення порогових значень норми:

верхній поріг:

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

нижній поріг:

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

3.7. Розрахунок числових показників надійності (доповнення до портрету)

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

3.8. Розрахунок дисперсії

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

3.9. Знаходження числа викидів в нормі

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

Для розпізнавання застосовані наступні вирішальні правила:

а) експертна оцінка відхилення поведінки контрольованого сигналу від норми – у тому числі візуальне порівняння характеру контрольованого сигналу;

б) попередня оцінка характеру сигналу, що включає порівняння нормованого сигналу $S_j(k)$ досліджуваного стану із статистичним портретом норми $\bar{S}_n(k)$ і пороговими значеннями норми. Якщо функція контрольованого сигналу «входить» в область «норми», то його можна вважати відповідним справному стану агрегату;

в) порівняння числових показників – нормального відхилення і дисперсії (S_n, D_n) для свідомо справного і досліджуваного клапанів;

г) оцінювання числа викидів з «норми» (M_n) для свідомо справного і досліджуваного клапанів;

д) порівняння енергетичних характеристик контрольованого сигналу для справного і досліджуваного клапанів.

Поведінка сигналу, реєстрованого в усіх точках виміру за наявності несправності, істотно відрізняється від сигналів, отриманих на справному клапані. Мають місце як аномальні викиди по амплітуді сигналів, так і відхилення за часом появи максимумів амплітуд віброприскорень і акустичного сигналу. Це дозволяє за першою оцінкою підтвердити наявність аномалій в роботі клапана.

Попередня оцінка характеру контрольованого сигналу дає наступні результати – при деформації штока або руйнуванні елементу ущільнювача статистичні портрети виходять за порогові

відхилення норми. Аналогічна ситуація спостерігалася і при просадці елементу ущільнювача клапана. Наявність несправностей такого роду і міри діагностується упевнено по статистичному портрету сигналів, що контролюються. Засмічення клапана сторонніми частками і також при незначних перекосах елементів ущільнювачів клапана по статистичних характеристиках віброакустичного сигналу практично знаходиться в межах норми.

Інформативність енергетичної характеристики сигналу відносно діагностування несправностей типу засмічення клапана декілька вище, ніж приведених статистичних характеристик. Порівняння енергії як акустичного сигналу, так і сигналу віброприскорень дозволяє ідентифікувати несправність, обумовлену попаданням сторонніх часток в зазор сідло-таріль. Проте, і в разі використання енергетичних характеристик, однозначного розпізнавання характеру несправності, тим більше, міри розвитку несправності, отримати не вдається. Оцінюючи працездатність і інформативність способу імпульсно-акустичної діагностики елементів автоматики, доводиться визнати необхідність подальшого відпрацювання методу. При цьому представляється доцільним як проведення випробувань елементів автоматики різних типів з різними несправностями, з метою набору статистичної інформації, так і розширення переліку вирішальних правил. Зокрема, найбільш інформативним може бути частотний аналіз контрольованого сигналу.

Також для ідентифікації застосовувалися методи спектрального аналізу, які дали впевненіші результати, що дозволило виділити інформативні компоненти досліджуваних сигналів. Для затвердження результатів ідентифікації застосовувалися методи математичного моделювання, впровадження яких дозволило підтвердити працездатність, достовірність і інформативність пропонованої методики.

Висновки

Розроблена методика з високою мірою достовірності дозволяє визначати

технічний стан об'єкту діагностування як справне або виявити наявність характерних дефектів обладнання. Експериментальне відпрацювання і запропонована методика обробки результатів показало працездатність методу. Розроблений і виготовлений експериментальний стенд дозволяє досліджувати різних типів елементів автоматики систем живлення ракет-носіїв. Отримані результати можуть бути використані в інших наукових дослідженнях, а також в практичних завданнях випробувань різних елементів і вузлів новостворюваних виробів ракетно-космічної техніки.

Бібліографічні посилання

1. Дорофеев А. А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчет и проектирование: учебник – 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 571 с.
2. Галеев А. Г. Основы устройства испытательных стендов для отработки жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок. Руководство для инженеров-испытателей. Пересвет: Изд-во ФКП “НИЦ РКП”, 2010. 178 с.
3. Wei Zhang. Failure Characteristics Analysis and Fault Diagnosis for Liquid Rocket Engines, Springer-Verlag Berlin Heidelberg and National Defense Industry Press, 2016. 401 p.
4. A.N. Ponomaryov, A.V. Sichevoy. The Experimental Test Bench for Testing of Components of the Automatic Equipment of Spacecrafts and Carrier Rockets //Journal of Automation and Information Sciences, Volume 35, 2003 Issue 10 DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v35.i10.406.

Надійшла до редакції 22.11.2019

Відомості про автора



Пономарьов Олександр
Миколайович,
Україна. Дніпровський
національний університет
ім. Олесь Гончара.
Викладач.
Сфера інтересів – технічна
діагностика, випробування