

ГРНТИ 73.37.81

<https://doi.org/10.47533/2020.1606-146X.27>

К. АЛДАМЖАРОВ, К. КОШЕКОВ, И.* ПИРМАНОВ, Р. АНАЯТОВА

*АО «Академия Гражданской Авиации», Казахстан
e-mail: kazbek_a47@mail.ru, kkoshekov@mail.ru, kkoshekov@mail.ru,
ildar.pirmanov@mail.ru*

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВИБРОПРОЧНОСТИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Описан способ оценки состояния авиационного двигателя, основанный на теории идентификационных измерений и заключающийся в анализе свойств регулярности временных и корреляционных функций вибросигнала. Рассмотрен пример анализа динамики состояния авиационного двигателя в процессе полетных испытаний. Выделены четыре класса состояний по шкале «норма - дефект».

Ключевые слова: алгоритм, диагностика, идентификационные измерения, квазичастота, параметр регулярности, порядковая шкала, случайный сигнал.

Известные способы оценки состояния объектов и процессов основаны на анализе некоторых количественных характеристик, полученных субъективным или объективным путем. При использовании объективных способов, основанных на измерениях физических величин, наиболее важной является проблема выбора информативных свойств объекта или процесса. Если рассматривать сигналы как носители информации, то указанная проблема сводится к выбору тех параметров сигналов, которые наиболее полно отражают исследуемое свойство объекта диагностики.

Помимо традиционных подходов при диагностике авиационных двигателей, в последнее время стали широко применяться нечеткая логика, вейвлет-анализ, технологии искусственных нейронных сетей, искусственного интеллекта и экспертных систем, функциональные и алгоритмические подходы.

В данной статье предлагается собственный способ диагностики, основанный на идеях и методах теории идентификационных измерений, систематически изложенной в монографиях и кратко представленной в ряде статей, где доказана возможность количественного оценивания (измерения) формы характеристик сигналов.

Целью данной работы является описание способа анализа временных и корреляционных функций сигналов с вибродатчиков применительно к задаче диагностики авиационных двигателей.

*Адрес для переписки. E-mail: ildar.pirmanov@mail.ru

Методика и инструменты исследования. Задача диагностики рассматривается в следующей постановке. Имеется объект диагностики (авиационный двигатель – АД), который проходил полетные испытания. Каждый полет (всего их было 13) сопровождался записью сигнала с вибродатчика, который контролировался визуально группой инженеров-испытателей.

Поведение объекта в самом первом полете (файл 1_2.txt) было однозначно оценено экспертами как абсолютно нормальное (НОРМ). Поведение объекта в самом последнем 13 полете (файл 13_2.txt) было однозначно оценено экспертами как абсолютно дефектное (ДЕФЕКТ). При этом, чтобы не произошло разрушения, пришлось даже принудительно остановить работу АД, выключив его.

Требуется: 1) оценить все промежуточные состояния в терминах НОРМ – ДЕФЕКТ; 2) выявить номера полетов, в которых происходили качественные изменения состояния объекта.

Методика исследований была основана на гипотезе о том, что наличие дефектов в процессе работы АД приводит к появлению в вибросигнале неких, условно регулярных компонент, которые, хотя и синхронизированы с частотой вращения, но имеют случайное амплитудное распределение. В рамках данной гипотезы бездефектное (близкое к идеальному) состояние АД характеризуется наличием основной гармоника частоты вращения на фоне «белого» шума с нормальным распределением.

Предложение сводится к тому, чтобы, во-первых, анализировать совместно временную и автокорреляционную функции сигналов и, во-вторых, измерять в них относительное содержание регулярной (или хаотической) компоненты. Показатель, количественно оценивающий свойство регулярности, в дальнейшем будем называть параметром регулярности (Regul) с диапазоном изменения от 0 до 1. Если Regul = 0, сигнал считается полностью хаотическим (случайный). Если Regul = 1, сигнал полностью регулярный (не случайный). Понятие «регулярный сигнал» в данном случае включает в себя как частный случай детерминированные сигналы, в том числе периодические.

В основе предлагаемого способа лежит предположение о том, что предельные, качественные («НОРМ» и «ДЕФЕКТ») состояния объекта диагностики отображаются предельными значениями параметра регулярности и, соответственно, должны находиться на противоположных концах шкалы $0 \leq \text{Regul} \leq 1$. Другими словами, необходимо проверить, имеют ли дефекты АД шкалу проявлений, коррелирующую со шкалой типа «Regul».

В качестве подтверждения правильности предлагаемого подхода на рис. 1 представлены графики временных и корреляционных функций двух крайних в качественном отношении полетов – нормального (левый столбец) и дефектного (правый столбец).

Действительно, сравнивая, например, по ширине корреляционные функции, можно достаточно уверенно сказать, что доля случайной компоненты в сигнале типа НОРМ (имя файла 1_2.txt) должна быть выше и, соответственно, степень регулярности – меньше, чем в сигнале типа ДЕФЕКТ (имя файла 13_2.txt). Это утверждение подтверждают и результаты измерений, помещенные в нижней части рис. 1.

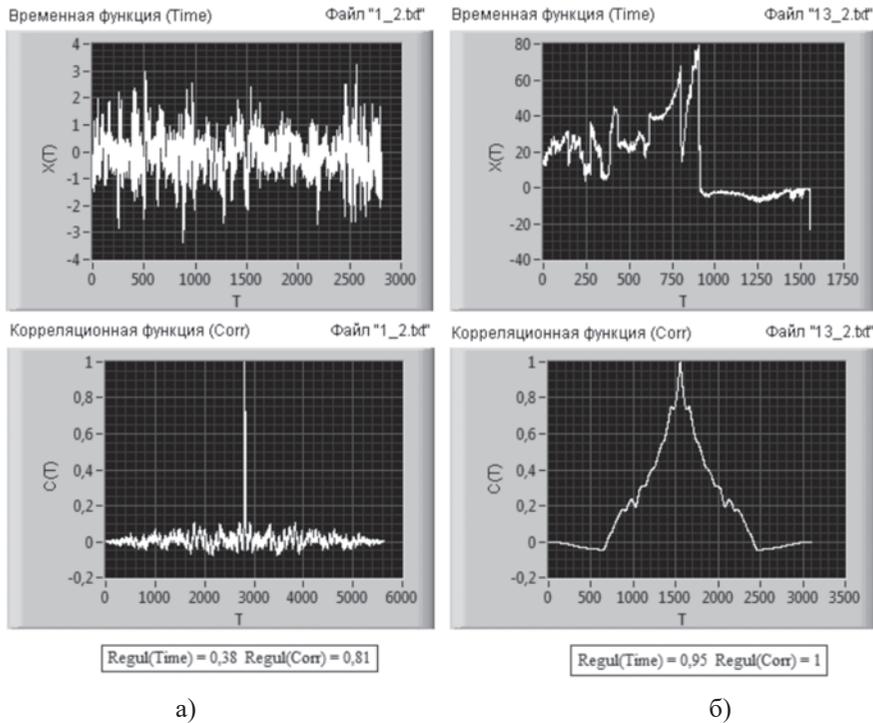


Рисунок 1 – Сравнение графиков временных и корреляционных функций сигналов в первом (НОРМ) (а) и тринадцатом (ДЕФЕКТ) (б) полетах

Инструментальная основа предлагаемого способа измерения параметра регулярности сигналов базируется на алгоритме равномерного, случайного перемешивания индексов всех отсчетов идентифицируемой корреляционной или временной функции. Таким образом, эти функции превращаются в случайные, даже если они и содержали регулярные компоненты. Случайная реплика сохраняет значения всех отсчетов, форму и параметры распределения исходной корреляционной (или временной) функции. Но особенно важно то, что при таком преобразовании изменяется важнейший идентификационный параметр сигнала – квазичастота.

В отличие от классической теории сигналов, идентификационная теория вводит понятие квазичастоты как *количества появления одноименных локальных экстремумов сигнала за единицу времени*. Это дает возможность оценивать частоту любых сигналов, в том числе случайных.

Физический смысл понятия «квазичастота» состоит в том, что для периодических сигналов ее значение совпадает с циклической частотой. Для случайных сигналов квазичастота F_c связана с их формой распределения. В табл. 1 для случайных сигналов с симметричными распределениями: двумодальным (2mod), арксинусным (asin), равномерным (even), трапецеидальным (trap), треугольным (simp), нормальным (gaus), двусторонним экспоненциальным (lap1) и Коши (kosh) даны оценки основных идентификационных параметров – параметра формы (A) и квазичастоты (F_c). Табл. 1 называется идентификационной шкалой (ИШ) распределений.

Таблица 1 – Идентификационная шкала распределений

| N = 10000, K = 100, t _n = 1с | Отметки шкалы – реперные точки (вид закона распределения случайного сигнала) | | | | | | | |
|--|---|----------|----------|------|------|------|------|------|
| | 2mod | asin | even | trap | simp | gaus | lapl | kosh |
| Rank | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| <A>, рад | 4 | 6,28 | 8 | 10 | 12 | 19 | 36 | N |
| <F _c >, Гц | 2500 | 2027 | 1667 | 1350 | 1180 | 736 | 416 | 6 |
| Аналог | squ | sin, cos | tri, saw | | | | | |

Примечание: N – объем выборки реализации сигнала; K – количество реализаций сигнала; t_n – время наблюдения сигнала; Rank – порядковый номер отметки на шкале; <A>, <F_c> – значения параметров A, F_c усредненные по L реализациям сигнала для каждой отметки шкалы.

В строке «Аналог» указаны имена периодических сигналов единичной частоты (F = 1) прямоугольной (squ), синусоидальной (sin), косинусоидальной (cos), треугольной (tri) и пилообразной формы (saw), имеющих такие же значения параметра формы, как и у случайных сигналов с двумодальным (A_{2mod} = A_{squ}), арксинусным (A_{asin} = A_{sin} = A_{cos}) и равномерным (A_{even} = A_{tri} = A_{saw}) распределениями соответственно.

В процессе проведения исследований была установлена новая для теории сигналов закономерность, в соответствие с которой:

$$F_c \leq F_x, \text{ при } A = A_x. \tag{1}$$

Соотношение (1) следует читать так: «Квазичастота F_c случайного сигнала всегда больше или равна характеристической частоте F_x любого другого сигнала с таким же значением параметра формы, т.е. таким же распределением мгновенных значений».

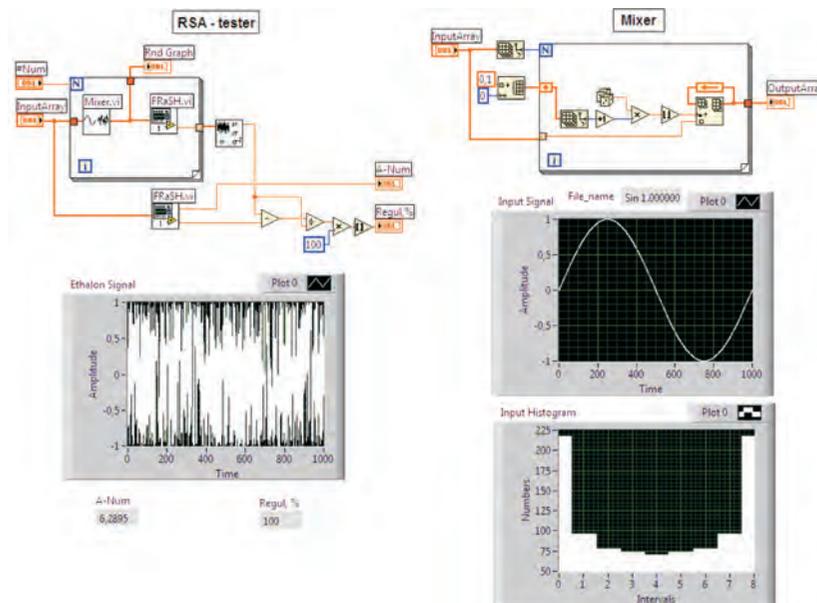


Рисунок 2 – Структура и компоненты преобразователя сигналов

На рис. 2 представлены инструменты, выполненные в среде LabVIEW, которые реализуют предлагаемый способ с помощью алгоритма равномерного случайного перемешивания отсчетов входной выборки сигнала. Основной модуль преобразователя (RSA-tester) содержит два идентификационных тестера (FRaSH.vi), миксер (Mixer.vi), цикл (обозначен в виде ) и измерительную цепь, предназначенную для вычисления параметра регулярности (Regul, %).

Нижний по схеме идентификационный тестер измеряет параметр формы (A-Num) и квазичастоту (F_x) массива (Input Array) входного сигнала, в соответствии с табл. 1.

Верхний по схеме идентификационный тестер измеряет квазичастоту (F_i) перемешанного массива, полученного из входного сигнала. Миксер непосредственно реализует функцию перемешивания номеров отсчетов входного сигнала. Количество перемешиваний задается с панели управления в окне #Num. Измеренные значения (F_i) усредняются. Параметр регулярности (Regul, %) оценивается по формуле:

$$Regul = 1 - \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{F_x}{F_i}, \quad (2)$$

где: L – количество перемешиваний.

Принцип действия миксера заключается в следующем. Из исходного массива (Input Array) поочередно извлекаются значения отсчетов. Первоначальные индексы (i) этих отсчетов случайным образом (по равномерному закону) заменяются другими индексами (j), но так, чтобы не было повторов. В итоге на выходе миксера формируется новый массив тех же самых отсчетов, но с другими, случайными индексами (порядковыми номерами).

На дисплеях (рис. 2) отражены результаты тестирования преобразователя синусоидальным входным сигналом (File_name Sin-1,000000) единичной частоты и объема выборки $N = 1000$. Выходной случайный сигнал (Ethalon Signal), называемый также репликой, имеет такой же объем, одинаковое с входным сигналом действующее значение ($U_{эфф} = 0,707$ В) и форму (A-Num = 6,2895 радиан) распределения (Input Histogram).

При этом относительная разность квазичастот (сигнала $F_x = 1$ Гц и реплики $F_{asin} = 203$ Гц для $N = 1000$) составила $Regul = (203 - 1) / 203 = 0,995$ или округленно $\approx 100\%$.

Тестирование преобразователя случайными сигналами, представленными своими реперными точками в ИШ (табл. 1), показало, что их регулярность в среднем близка к нулю, со стандартным отклонением в диапазоне от 1 до 10 % (в зависимости от числа анализируемых реализаций).

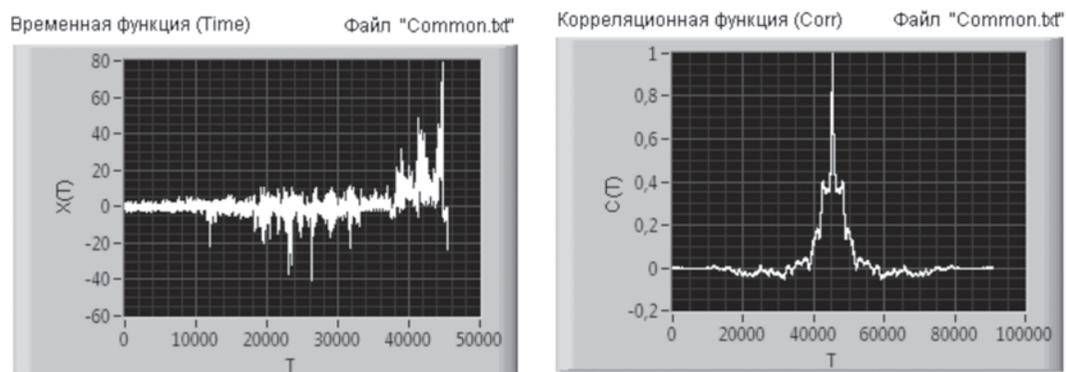
Таким образом, с помощью предлагаемого способа действительно можно оценивать такое фундаментальное свойство сигналов, как регулярность, и использовать это свойство для целей диагностики.

Результаты исследований. Применим рассмотренную технологию к анализу временных и корреляционных функций сигналов полетных испытаний (табл. 2), представив результаты в виде реляционной базы данных (БД).

Таблица 2 – База данных результатов измерений параметра регулярности (Regul) временной и корреляционной функций сигналов полетных испытаний

| № | FileName | Regul(Time) | Regul(Corr) | Gmean | N | NN |
|----|------------|-------------|-------------|----------|-------|-------|
| 1 | 1_2.txt | 0,38 | 0,81 | 0,554797 | 2813 | 2813 |
| 2 | 2_2.txt | 0,4 | 0,8 | 0,565685 | 6488 | 9301 |
| 3 | 3_2.txt | 0,46 | 0,86 | 0,628967 | 2188 | 11489 |
| 4 | 4_2.txt | 0,64 | 0,95 | 0,779744 | 3243 | 14732 |
| 5 | 5_2.txt | 0,75 | 0,99 | 0,861684 | 3726 | 18458 |
| 6 | 6_2.txt | 0,66 | 0,92 | 0,77923 | 4267 | 22725 |
| 7 | 7_2.txt | 0,66 | 0,94 | 0,787655 | 3088 | 25813 |
| 8 | 8_2.txt | 0,65 | 0,93 | 0,777496 | 3721 | 29534 |
| 9 | 9_2.txt | 0,77 | 0,99 | 0,873098 | 3557 | 33091 |
| 10 | 10_2.txt | 0,79 | 0,99 | 0,884364 | 5042 | 38133 |
| 11 | 11_2.txt | 0,81 | 1 | 0,9 | 2890 | 41023 |
| 12 | 12_2.txt | 0,85 | 1 | 0,921954 | 2788 | 43811 |
| 13 | 13_2.txt | 0,95 | 1 | 0,974679 | 1553 | 45364 |
| 14 | Common.txt | 0,86 | 1 | 0,927362 | 45364 | 45364 |

Файл Common.txt (№ 14), представляющий собой последовательную компиляцию всех полетов (рис. 3), отображает в целом поведение АД за время испытаний. Чтобы оценить положение характерных выбросов сигнала на графике (рис. 3), в табл. 2 добавлены два столбца с данными о длительности отдельных полетов (столбец “N”) и накопленной длительности (столбец “NN”).

**Рисунок 3** – Вид компилированного сигнала всех полетов и его корреляционная функция

Если объединить результаты измерений степени регулярности для временной (Regul(Time)) и корреляционной (Regul(Corr)) функций в один интегрированный показатель в виде среднего геометрического:

$$Gmean = \sqrt{Regul(Time) * Regul(Corr)} \quad (3)$$

и отсортировать БД по этому параметру, то получим график (рис. 4), показывающий скрытую закономерность – изменение состояния АД в полетных испытаниях.

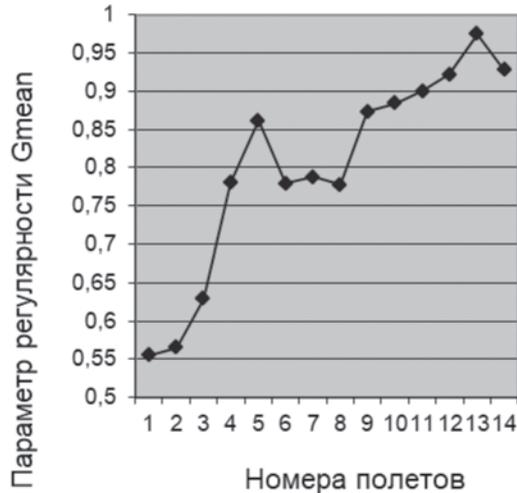


Рисунок 4 – Динамика состояния АД в полетных испытаниях

Для того чтобы классифицировать полеты в терминах НОРМ-ДЕФЕКТ, разобьем отсортированную функцию Gmean (табл. 2) постановкой соответствующих фильтров, указанных в табл. 3.

Таблица 3 – Классификация полетных испытаний АД

| Номер класса | Условия разделения классов | Номера полетов | Накопленная длительность, в числе отсчетов | Характеристика класса |
|--------------|----------------------------|--------------------|--|-----------------------|
| 1 | $Gmean < 0,7$ | 1; 2; 3 | 11489 | норма |
| 2 | $0,7 \leq Gmean < 0,8$ | 4; 6; 7; 8 | 25808 | полунорма |
| 3 | $0,8 \leq Gmean < 0,9$ | 5; 9; 10 | 38133 | полудефект |
| 4 | $Gmean \geq 0,9$ | 11; 12; 13; Common | 45364 | дефект |

Заключение. Полученные с помощью предложенного способа результаты позволяют сделать следующие выводы.

1) проводить классификацию состояния объекта диагностики – авиационного двигателя.

2) определить местоположение критических точек и участков, где поведение АД отличается от нормального. Так, например, исходя из верхнего графика (рис. 3) видно, что в сигнале Common.txt первый существенный выброс появляется в 4-ом полете, вблизи отсчета с номером 12000. Но, именно на этом участке наблюдается (рис.

4) наибольшая скорость изменения эволюционной характеристики. Все это указывает на проявление некоторого и, по-видимому, основного дефекта АД. Изменение знака скорости эволюционной характеристики после 5-го полета свидетельствует о проявлении другого типа дефектов, что в целом стабилизировало состояние АД в 6-ом, 7-ом и 8-ом полетах. Однако в 9-ом полете скорость изменения эволюционной характеристики вновь увеличилась, что, в конечном итоге, и привело к аварийному отключению АД в 13-ом полете.

3) предложенный способ оценки состояния объектов диагностики является универсальным в том смысле, что позволяет измерять параметр регулярности не только сигналов и их характеристик, но и любых объектов и процессов, представленных совокупностью выборочных значений.

Перспективы применения данного способа связаны, прежде всего, с решением задач технической диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

1 Gayme D., Menon S., Ball C., Mukavetz D., Nwadiogbu E. Fault diagnosis in gas turbine engines using fuzzy logic // SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme – System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483). 2003. Vol.4. P. 3756-3762.

2 Yu B, Liu D, Zhang T. Fault diagnosis for micro-gas turbine engine sensors via wavelet entropy // Sensors. 2011. Vol.11. Iss. 10. P. 9928-9941.

3 Donald L. Simon, Sébastien Borguet, Olivier Léonard, Xiaodong (Frank) Zhang. Aircraft Engine Gas Path Diagnostic Methods: Public Benchmarking Results // ASME J. Eng. Gas Turbines Power. 2014. Vol. 136. Iss. 4. P. 041201. 10.1115/1.4025482.

4 DePold H. R., Gass F. D. The Application of Expert Systems and Neural Networks to Gas Turbine Prognostics and Diagnostics // ASME J. Eng. Gas Turb. Power. 1999. Vol. 121Iss. 4. P. 607–612. 10.1115/1.2818515.

5 Jaw L. C. Recent Advances in Aircraft Engine Health Management (EHM) Technologies and Recommendations for the Next Step // ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Paper No. GT2005-68625. P. 683-695. 10.1115/GT2005-68625.

6 Кликушин Ю.Н. Идентификационные инструменты анализа и синтеза формы сигналов: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 216 с. [Klikushin YU.N. Identifikacionnye instrumenty analiza i sinteza formy signalov: monografiya. – Омск: Izd-vo OmGTU, 2010. – 216 s.]

7 Кобенко В. Ю. Идентификационные измерения: методы, модели, технологии : монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 208с. [Kobenko V. YU. Identifikacionnye izmereniya: metody, modeli, tekhnologii : monografiya. – Омск: Izd-vo OmGTU, 2014. – 208s]

8 Klikushin Yu. N., Koshekov K. T., Kobenko V. Yu., Trunin E. S. An algorithm for evaluating the state of a generating unit based on the identification measurements of vibrosignals // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. Vol. 50. № 7. P. 413 – 418.

9 Koshekov K. T., Klikushin Yu. N., Kobenko V. Yu., Sof'ina N.N., Savostin A.A., Kashevkin A.A. Testing a pump unit by identification measurements of vibration signals // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. Vol. 52. № 5. P. 280 – 286.

10 Klikushin Yu. N., Kobenko V.Yu., Koshekov K.T., Belosludtsev O.M., Koshekov A.K.. Search of the operational earthquake precursors on the basis of the identification measurements of the seismographic records // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics – 2016): Proceedings of X IEEE International Scientific and Technical Conference. Nov. 15–17, 2016, Omsk, Russia. 2016. P.1 – 6.

11 Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1977. [Gonorovskij I. S. Radiotekhnicheskie celi i signaly. – M.: Sovetskoe radio, 1977.]

12 Klikushin Yu.N., Kobenko V.Yu., Stepanov P.P. Basics of identification measurement technology // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 944. №1. P. 012050.

К. Б. АЛДАМЖАРОВ, К. Т. КОШЕКОВ, И. А. ПИРМАНОВ, Р. К. АНАЯТОВА

*«Азаматтық авиация академиясы» АҚ, Қазақстан
e-mail: kazbek_a47@mail.ru, kkoshekov@mail.ru, kkoshekov@mail.ru,
ildar.pirmanov@mail.ru*

МЕМЛЕКЕТТІ БАҒАЛАУ ҮШІН ИДЕНТИФИКАЦИЯЛАУ ӘДІСІ АЭРОГРАММА ИНЖЕНЕРІНІҢ ВИБРАЦИЯЛЫҚ КҮШІ

Сәйкестендіру өлшеулеріне негізделген және уақытша, корреляциялық дірілді белгі функцияларының жүйелілігі қасиеттерінің талдауында қорытындыланған авиациялық қозғалтқыш күйін бағалау әдістері сипатталған. Ұшу сынауларын жүргізу үрдістеріндегі авиациялық қозғалтқыш күйінің динамикасының талдау үлгісі қарастырылған. «Норма-ақаулық» шкаласы бойынша күйдің төрт сыныбы бөлініп көрсетілген.

***Түйін сөздер:** алгоритм, диагностика, сәйкестендіру өлшеулері, квазижиілік, жүйелілік параметрі, реттік шкала, кездейсоқ белгі.*

K. B. ALDAMZHAROV, K. T. KOSHEKOV, I. A. PIRMANOV, R. K. ANAYATOVA

*Academy of Civil Aviation, Kazakhstan
e-mail: kazbek_a47@mail.ru, kkoshekov@mail.ru, kkoshekov@mail.ru,
ildar.pirmanov@mail.ru*

IDENTIFICATION METHOD FOR ASSESSING THE STATE VIBRATION STRENGTH OF THE AIRCRAFT ENGINE

A method for aircraft engine state assessment is described, based on the theory of identification measurements and consisting in the analysis of the regularity properties of the temporal and correlation functions of the vibration signal. An example of an aircraft engine dynamics analysis during flight tests is considered. Four classes of states are distinguished according to the “norm – defect” scale.

***Keywords:** Algorithm, diagnostics, identification measurements, quasi-frequency, regularity parameter, ordinal scale, random signal.*